MÜHENDİSLİK

ALANINDA ULUSLARARASI ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRMELER

CİLT 2

EDİTÖR

DOÇ. DR. SELAHATTİN BARDAK

ARALIK
2023

SERÜVEN YAYINEVİ

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2023

ISBN • 978-625-6760-52-3

© copyright
Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.
The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing
Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
Telefon / Phone: 05437675765
web: www.seruvenyayinevi.com
e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume
Sertifika / Certificate No: 47083

MÜHENDİSLİK

Alanında Uluslararası Araştırma ve Değerlendirmeler

Cilt 2

Aralık 2023

Editör

DOÇ. DR. SELAHATTİN BARDAK

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

GECİKMELİ FONKSİYONEL DİFERANSİYEL DENKLEMLER TARAFINDAN MODELLENEN ZAMAN GECİKMELİ SİSTEMLERİN BENZETİMLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Gülten ÇETİNTAŞ, Vedat ÇELİK 1

Bölüm 2

ÇOK MODLU ULAŞTIRMA VE YÜKSEK HIZLI TREN PLANLAMASI

Mehmet Çağrı KIZILTAŞ *23*

Bölüm 3

BATARYA VE BATARYA SİSTEMLERİNİN GELECEĞİNDE YAPAY ZEKA FAKTÖRÜ

Erhan KAVUNCUOĞLU *39*

Bölüm 4

KÜMELEME ANALİZİ YÖNTEMLERİNİN GENEL DEĞERLENDİRMESİ

Mesut SAMASTI *57*

Bölüm 5

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİNDE ÇOKLU CİSİM DİNAMİĞİ VE SONLU ELEMANLAR YONTEMİNİN BÜTÜNLEŞİK KULLANIMI VE OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA UYGULANMASI

Mehmet ÇALIŞKAN *71*

Bölüm 6

OTONOM ARAÇLARDA SİBER SALDIRI KAYGILARI VE BU KAYGILARI GİDERMEK ÜZERE ALINAN TEDBİRLER ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

M. Akif KUNT, Haluk GÜNEŞ *97*

Bölüm 7

BİYOGAZ ÜRETİMİ İLE ENTEGRE ENERJİ SANTRALİ TASARIM VE İŞLETME PARAMETRELERİNİN İRDELENMESİ

Halit ARAT , Oğuzhan ERBAŞ *111*

Bölüm 8

PARSEL VE SİTE İÇİ OTOPARK DÜZENLEMESİNİN İRDELENMESİ

Fazıl NACAR..... 125

Bölüm 9

DEPREMLER SIRASINDA GÖRÜLEN YANAL ZEMİN DEFORMASYONLARININ BELİRLENMESİ

Hüseyin Suha AKSOY, Aykut ÖZPOLAT 145

Bölüm 10

DETONASYON VE ŞOK DALGALARINDA EKSERJİ ANALİZİ

Arzu KEVEN, Cengiz ÖNER 179

Bölüm 11

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN ÜRETİM PERFORMANS ANALİZİ VE KAMU KURUMLARI İÇİN SANTRAL ÖRNEĞİ

Samet Giray TUNCA, Kadir OLCAY, Mustafa Arif ÖZGÜR..... 195

Bölüm 12

ÇOK CİSİMLİ MODELLEME YÖNTEMİ İLE BİR SEDAN ARACIN TAM TAŞIT MODELİNİN KURULMASI VE AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİ İLE KONTROLÜNÜN İNCELENMESİ*

Lütfü TUTAR, Elif ERZAN TOPÇU 217

Bölüm 13

ZEOLİTLERİN VE ZEOLİT KATALİZÖRLERİN ASİT-BAZ KARAKTERİZASYONLARINDA KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİSİ (IR) UYGULAMALARI

Ceyda BİLGİÇ 235

Bölüm 14

ÜÇ BOYUTLU POLİMERİK DOKU İSKELELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Kürşat KANBUR, İlyas TÜRKMEN, Fatih SARGIN..... 255

Bölüm 15

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE ORGANOMETALİK YAPILARIN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ

Kübra ARDUÇ , Mustafa KARAKAYA 289

Bölüm 16

15 kV XLPE İZOLELİ KABLONUN YAŞLANMA DURUMUNUN MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Mustafa KARHAN *305*

Bölüm 17

ATIK SULARDAN BOYA GİDERİMİNDE SİKLODEKSTRİN TEMELLİ ADSORBANLAR

Halil İbrahim ÇETİNTAŞ..... *319*

Bölüm 18

MİKROENKAPSÜLASYON: TEKNİKLER, KULLANILAN YÖNTEMLER VE SÜT ENDÜSTRİSİNDEKİ DURUMU

Özlem AYDIN *331*

Bölüm 19

GELİŞMİŞ VE GELİŞMEKTE OLAN ÜLKELER İÇİN BİR ÇEVRESEL ETKİNLİK DEĞERLENDİRMESİ

Melike Kübra EKİZ BOZDEMİR *345*

Bölüm 20

REKÜPERATÖRLÜ KOJENERASYON TESİSLERİNDE HAVA FAZLALIK KATSAYISININ PERFORMANS ÜZERİNE ETKİSİ

Rabi KARAALİ..... *359*

Bölüm 21

ÇOKLU KAVŞAK SİNYAL KONTROL MODELLEME

Ayşe Nilgün KAYADELEN..... *377*

Bölüm 22

EMÜLSİYON SİSTEMLER VE STABİLİTELERİ

İrem ALAÇIK DEVELİOĞLU, Kemal Kaan TEKİNŞEN..... *391*

Bölüm 23

GIDA MUHAFAZADASINDA FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ VE ÖNEMİ

Tuğba GÜNGÖR ERTUĞRAL..... *427*

Bölüm 24

DOĞAL ANTİMİKROBİYAL BİR METABOLİT: PROPOLİS

Sabire YERLİKAYA, Cemalettin SARIÇOBAN 443

Bölüm 25

TAHMİNSEL MODELLEMELERİN GIDA MİKROBİYOLOJİSİ AÇISINDAN ÖNEMİ

Ali SOYUÇOK 461

Bölüm 26

GIDALARDA DOĞAL OLARAK BULUNAN VEYA BULAŞAN TOKSİK MADDELERİN SAĞLIK ÜZERİNE ETKİLERİ

Arzu KAVAZ YÜKSEL, Mehmet YÜKSEL 475

Bölüm 27

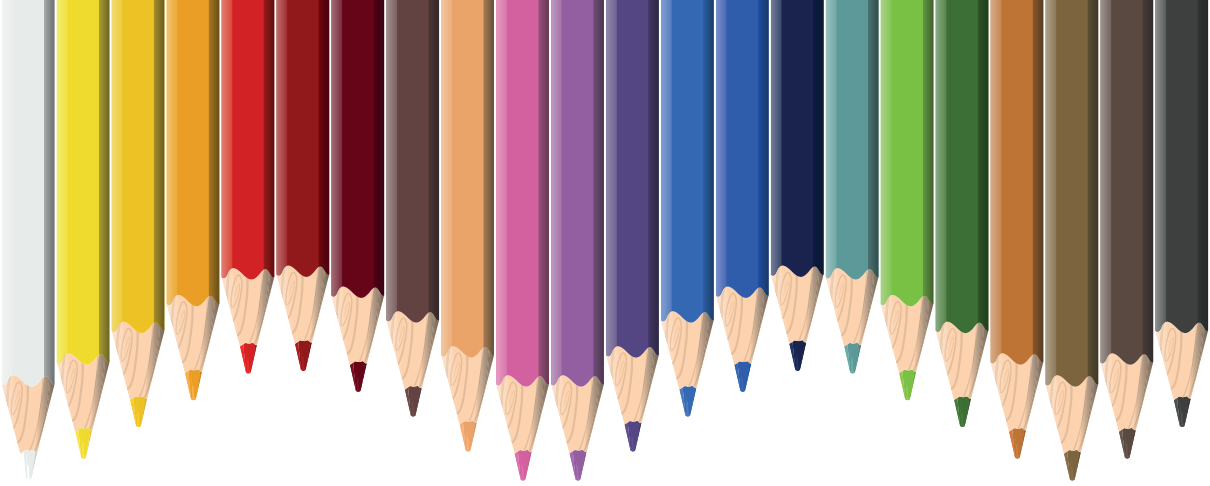
GIDA ALERJİLERİ VE BAĞIRSAK MİKROBİYOTASININ ROLÜ

Tuba ERKAYA KOTAN, Zeynep GÜRBÜZ 499

Bölüm 28

DUVAR KAROSU MAT SIR REÇETELERİNDE UÇUCU KÜL KATI ATIK KATKISININ KİMYASAL DAYANIM ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yiğit BALBAĞ, Hale YILDIZAY, Eda TAŞÇI 527



Bölüm 1

GECİKMELİ FONKSİYONEL DİFERANSİYEL DENKLEMLER TARAFINDAN MODELLENEN ZAMAN GECİKMELİ SİSTEMLERİN BENZETİMLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Gülten ÇETİNTAŞ[1]
Vedat ÇELİK[2]

1 Arş. Gör. Dr. Gülten ÇETİNTAŞ, Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Muş/TÜRKİYE, g.cetintas@alparslan.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8847-7190
2 Doç. Dr. Vedat ÇELİK, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ/TÜRKİYE, celik@firat.edu.tr, ORCID:0000-0001-8870-8465

1. GİRİŞ

Fiziksel veya biyolojik yapıların matematiksel sistem temsilleri genellikle sistemlerin anlık durumlarına bağlıdır. Fakat bazı sistem dinamikleri sadece o andaki durumlarına değil, aynı zamanda geçmişteki durumlarına da bağlı olabilmektedir. Bu tip sistemler zaman gecikmeli sistemler olarak adlandırılırlar (Hale ve Lunel, 1991; Mahmoud, 2000). Zaman gecikmesi, sistem davranışını belirleyen kritik bir kavramdır ve bu gecikmenin sistem üzerindeki etkisi son derece önemlidir. Zaman gecikmesi, sistemin çalışma şekline ve birbirini etkileyen sistem elemanlarına bağlıdır. Gecikmenin varlığı, sistem analizini ve kontrolünü önemli ölçüde karmaşık hale getirebilir ve bu durum, sistemde kararsızlığa ve düşük performansa yol açabilir (Kolmanovskii vd., 1999; Gontkovıc, ve Fonod, 2011).

Zaman gecikmesi, tabiatın çeşitli sistemlerinde, fiziksel, kimyasal, biyolojik, ekolojik ve toplumsal bağlamda yaygın olarak gözlemlenen bir olgudur. Örneğin, kanser oluşumu genellikle uzun süreli radyasyon maruziyetinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Ekonomik bağlamda, bir ülkenin merkez bankası, genellikle ekonomiyi yönlendirmek amacıyla faiz oranlarını düzenlemeye çalışır; ancak faiz oranlarındaki değişikliklerin ekonomi üzerindeki etkisi genellikle aylarca süren bir süreci içerir. Politika alanında, politikacılar kararlarını uygulamak için zaman harcamak zorundadırlar ve kararlarının doğruluğunu değerlendirmek için bir süre beklemeleri gerekebilir. Bu doğal süreçlerin yanı sıra, mühendislik sistemlerinde de zaman gecikmeli sistemlere sıkça rastlanmaktadır. kontrol sistemleri, kimyasal süreçler, iletişim ağları, sualtı araçları ve biyosistemler gibi çeşitli mühendislik sistemleri, zaman gecikmeli sistemlere örnek olarak verilebilir (Zhong, 2006; Çetintaş, 2016).

Gerçek dünya uygulamalarında, bir dizi olayda zaman gecikmesinin mevcut olması kaçınılmaz bir durumdur. Sistemler matematiksel modellerle tasvir edilirken, bu modellerdeki gecikmeler genellikle ihmal edilir. Ancak, modellenen sistemlerdeki göz ardı edilebilecek kadar küçük gecikmeler bile, sistemde önemli değişikliklere neden olabilir. Bu durum, sistemin dinamiklerini anlama ve kontrol etme süreçlerinde, özellikle hassas sistemlerde ve gerçek zamanlı uygulamalarda dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Bu nedenle matematiksel modeller oluşturulurken fonksiyonel diferansiyel denklemlerin bir alt sınıfı olan gecikmeli diferansiyel denklemlerden faydalanılır. Bu amaçla, zaman gecikmeli sistemler ve bu sistemleri tanımlayan matematiksel modeller ayrıca bu modellerin benzetimlerinin gerçekleştirilmesi temel olarak bu çalışmada amaçlanmıştır. Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Bu girişle birlikte; ikinci bölümde, fonksiyonel diferansiyel denklemlerden

bahsedilip türleri açıklanmıştır. Fonksiyonel diferansiyel denklemlerin bir alt sınıfı olan gecikmeli diferansiyel denklemler üzerine odaklanılmıştır.

Üçüncü bölümde, zaman gecikmeli sistemlere yönelik birkaç örnek sistem sunularak, bu sistemlerin matematiksel modelleri üzerinde detaylı bir inceleme yapılmıştır. Özellikle, sistemlerin matematiksel modellerinde kullanılan gecikme teriminin önemine vurgu yapılmıştır.

Dördüncü bölümde ise bölüm üçte ele alınan av-avcı popülasyonunun ve tek hücreli zaman gecikmeli hücresel sinir ağı modelinin Matlab/Simulink ortamında benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Farklı sistem parametreleri ve zaman gecikmesi değerleri için elde edilen nümerik sonuçlardan sistemlerin dinamik davranışları incelenmiştir.

Beşinci bölümde, çalışmada elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. FONKSİYONEL DİFERANSİYEL DENKLEMLER

Adi diferansiyel denklemlerde bilinmeyen fonksiyon ve türevleri sadece t anında hesaplanır. Gerçek hayatta bazı olaylar sadece o anki zamana değil aynı zamanda geçmiş ve gelecek zamana da bağlı olabilmektedir. Bu tür diferansiyel denklemlerde, bilinmeyen fonksiyon ve türevleri sadece t anında değil $t-\tau$ veya $t+\tau$ $(\tau>0)$ anında da hesaplanabilir. Bu tür diferansiyel denklemlere fonksiyonel diferansiyel denklemler (FDD) denir.

2.1.Fonksiyonel Diferansiyel Denklemlerin Sınıflandırılması

$\tau_{max} = sabit \in [0,\infty)$ kabul edilsin ve $x(t)$, $t \in [t_1 - \tau_{max}, t_1]$ zaman aralığı içinde bir işlemin davranışını tanımlayan n-boyutlu bir değişken olsun. $T_1(t)$ ve $T_2(t)$, tüm $t \in [t_0, t_1]$ için tanımlanan zamana bağlı gerçek sayılar kümesi olsun. $[t_0, t_1]$ aralığında x'in sürekli fonksiyon olduğu kabul edilsin. $\dot{x}(t)$, $[t_0, t_1]$ için x'in türevlerini belirtsin. Her bir $t \in [t_0, t_1]$ için x_t, $s \in T_1(t)$ şartıyla $x_t(s) = x(t+s)$ tarafından tanımlanır. Benzer olarak $\dot{x}_t$, $s \in T_2(t)$ olmak şartıyla $\dot{x}_t(s) = \dot{x}(t+s)$ olarak tanımlanır. Bu durumda x, hemen hemen her $t \in [t_0, t_1]$ için bir fonksiyonel diferansiyel denklemdir (Schoen, 1995). Genellikle bir FDD aşağıdaki gibi formüle edilir.

$$\dot{x}(t) = f(t, x_t, \dot{x}_t, u(t)) \tag{2.1}$$

Burada kontrol $u(t)$, gerekli olan tüm zaman aralığı için verilmektedir. Yukarıdaki denklem fonksiyonel diferansiyel denklemin üç tipini içermektedir.

2.1.1. İleri Fonksiyonel Diferansiyel Denklem

Eğer $t \in [t_0, t_1]$ için $T_1(t) \subset [0, \infty)$ ve $T_2(t) \neq \emptyset$ ise FDD bir ileri (advenced) fonksiyonel diferansiyel denklem (İFDD) olarak isimlendirilir. İlerlemiş tip bir denklem, durum değişme oranı, giriş sinyali, $u(t)$'nin şimdiki ve gelecekteki değerine bağlı olan bir sistemi temsil eder. Denklem (2.2), İFDD'nin bir örneğidir.

$$\dot{x}(t) = x(t+1) + x(t) + u(t) \tag{2.2}$$

Burada en yüksek mertebeden türev t anında, diğerleri t veya t'den daha sonraki zamanlarda hesaplanır.

2.1.2. Nötral Fonksiyonel Diferansiyel Denklemler

Eğer durum değişme oranı kendisinin geçmiş değerlerine bağlı ise sistem bir nötral (neutral) fonksiyonel diferansiyel denklem (NFDD) olarak adlandırılır. Yani, $t \in [t_0, t_1]$ için $T_1(t) \subset (-\infty, 0]$ ve $T_2(t) \subset (-\infty, 0]$ ise aralığındadır. (2.3)'teki lineer skaler sistem neutral sistemin bir örneğidir.

$$\dot{x}(t) = \dot{x}(t-1) + x(t) + u(t) \tag{2.3}$$

Burada en yüksek mertebeden türev sadece t'ye bağlı değil de hem gecikmeli (retarded) hem de ileri (advanced) terimlere bağlı olabilir.

2.1.3. Gecikmeli Fonksiyonel Diferansiyel Denklem

Eğer $t \in [t_0, t_1]$ için $T_1(t) \subset (-\infty, 0]$ ve $T_2(t) \neq \emptyset$ ise bir FDD gecikmektedir. Başka bir deyişle, Denklem (2.1)'in sağ tarafı x'in türevine bağlı değildir. Buna gecikmeli (retarded)
fonksiyonel diferansiyel denklem denir (GFDD). Denklem (2.4) GFDD'nin bir örneğidir.

$$\dot{x}(t) = ax(t-\tau) + u(t) \tag{2.4}$$

Burada en yüksek mertebeden türev t anında, diğerleri ise t veya t'den daha önceki zamanlarda hesaplanır. Örneğin, lineer skaler birinci dereceden bir denklemin basit durumunu düşünelim.

$$a_0 \frac{dx(t)}{dt} + a_1 \frac{dx(t-\tau)}{dt} + b_0 x(t) + b_1 x(t-\tau) = f(t) \qquad (2.5)$$

Burada a_0, a_1, b_0 ve b_1 sabit sayılar ve $f(t)$ bir zorlama fonksiyonudur. Eğer yukarıdaki denklemde $a_0 \neq 0$ ve $a_1 = 0$ ise Denklem (2.5) GFDD'dir. Eğer $a_0 \neq 0$ ve $a_1 \neq 0$ ise NFDD, $a_0 = 0$ ve $a_1 \neq 0$ ise İFDD'dir.

Bu çalışmada GFDD'ler incelenecektir. GFDD'ler,

$$\dot{x} = f\big(t, x(t), x(t-\tau_i)\big), \qquad x = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T \qquad (2.6)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, $\tau_i > 0$, $i = 1,2, \dots$, gecikme süresidir ve f sürekli fonksiyon vektörüdür. GFDD'ler,

1. Tek bir sabit gecikmeli $\tau = \tau_i$, $i = 1$
2. Farklı gecikmeli τ_i , $i = 1,2, \dots$,
3. Dağıtılmış gecikmeli (Diferansiyel denklemin sağ tarafı, geçmiş durumlar üzerinde ağırlaştırılmış integralden oluşur.)
4. Durum-bağımlı gecikmeli (τ_i' ler $x(t)$'ye bağlıdır.)
5. Zamana bağımlı gecikmeli (τ_i'ler t'ye bağlı.)

olmak üzere sınıflandırılırlar (Lakshmanan ve Senthilkumar, 2011; Cetintas, 2016).

3. ZAMAN GECİKMELİ SİSTEMLER VE MATEMATİKSEL MODELLERİ

Gerçek dünyada birçok olayda zaman gecikmelerinin kaçınılmaz olduğu bir gerçektir. Ancak, matematiksel modelleme süreçlerinde genellikle adi diferansiyel denklemler kullanılır ve bu denklemlerde zaman gecikmeleri genellikle göz ardı edilir. Çünkü adi diferansiyel denklemlerle oluşturulan matematiksel modellerde değişim oranı, geçmişteki durumdan bağımsız olarak yalnızca o anki duruma bağlıdır. Ancak, tutarlı bir matematiksel modelde, sistemdeki o anki durumun geçmişteki durumdan bağımsız olmaması gerektiği açıktır. Sistemdeki çok küçük bir gecikme miktarı bile, mevcut durumda önemli değişikliklere neden olabilir. Bu nedenle, matematiksel modeller oluşturulurken genellikle gecikmeli diferansiyel denklemler kullanılarak, sistemin zaman gecikmelerini daha doğru bir şekilde yansıtmak ve daha gerçekçi sonuçlara ulaşmak mümkündür.

Bu bölümde, matematiksel modelleri gecikmeli diferansiyel denklem kullanılarak oluşturulan Uçar modeli, av-avcı popülasyonu, içten yanmalı motor ve tek hücreli zaman gecikmeli hücresel sinir ağı modeli ele alınacaktır. Matematiksel modellerde kullanılan zaman gecikmesi terimine neden ihtiyaç duyulduğu açıklanacaktır.

3.1. Av-Avcı Popülasyonu

Son yıllarda biyolojik modellerin dinamik özelliklerinin incelenmesi bilhassa öne çıkmıştır. Biyolojik modeller arasında en çok yapılan çalışmalar av-avcı popülasyonu üzerinedir. İki tür içeren av-avcı sistemleri analiz edildiğinde, avcı olarak adlandırılan tür, av olarak adlandırılan türü tüketerek beslenir. Avlar ise ortamda bulunan diğer yiyecek kaynaklarını tüketerek beslenirler. Buna örnek olarak ormanda yaşayan tilki (avcı) ve tavşan (av) verilebilir. Tilkiler ormanda yaşayan tavşanları yerken tavşanlar ise ormanda belirli bitkileri yerler. Tilki ve tavşan arasında azalıp çoğalan fakat tümüyle yok olmayan damgasal bir ilişki sergilerler. Çünkü av olan popülasyonun tümüyle tükenmesi durumunda avcı popülasyonu da tükenmeye başlar. Bu iki tür arasında karşılıklı bir denge ilişkisi mevcuttur. Doğada bu tip örnekler daha da çoğaltılabilir. Uğur böceği (avcı) ile yaprak (av), levrek (avcı) ile güneşbalığı (av), köpekbalığı (avcı) ile balık(av) gibi birçok canlı arasındaki etkileşimden bahsedilebilir.

İki tür bir arada bulunduğu zaman olabileceklerle ilgili hipotez oluşturmak için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bunlar arasında literatürde kullanılan denklemlerin başında av-avcı popülasyonunu modelleyen Lotka-Volterra denklemleridir (Lotka, 1925; Volterra, 1926). Lotka-Volterra denklemleri, biyolojik sistemlerin dinamiklerini tanımlamak için sık kullanılan birinci dereceden doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin bir çiftidir. Lotka ve Volterra'nın yaptığı çalışmalara göre, av-avcı etkileşimini modellemek için izole bir ortamda t anındaki av türünün popülasyonu $x(t)$ ve avcı türünün popülasyonu $y(t)$ ile gösterilsin. Eğer ortamda avcı türünün hiç bulunmadığı varsayılırsa, av türünün popülasyon değişimi,

$$\dot{x}(t) = a_{11}x(t) \tag{3.1}$$

Denklem (3.1) ile gösterilebilir. $a_{11} > 0$ av türünün popülasyondaki artış oranıdır. Fakat popülasyonda avcı türünün varlığı gözönüne alınıra, avcı popülasyonunun artması av popülasyounun azalmasına sebep olacaktır. Bu durumda av popülasyonunun büyümesi $a_{12} > 0$ olmak şartıyla,

$$\dot{x}(t) = a_{11}x(t) - a_{12}x(t)y(t) \tag{3.2}$$

Denklem (3.2) ile verilebilir.

Diğer yandan, ortamda av türünün bulunmadığı varsayılırsa avcı türünün popülasyonunda azalma olacaktır. Bu durumda avcı türünün popülasyon değişimi $a_{21} > 0$ olmak şartıyla,

$$\dot{y}(t) = -a_{21}y(t) \tag{3.3}$$

Denklem (3.3) ile ifade edilir. Ortama av türünün eklenmesiyle popülasyondaki av türünün artışı ile avcı türünün artışı doğru orantılı olacaktır. Bu durumda av-avcı sisteminin,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= a_{11}x(t) - a_{12}x(t)y(t) \\ \dot{y}(t) &= -a_{21}y(t) + a_{22}x(t)y(t) \end{aligned} \tag{3.4}$$

(3.4) denklem takımıyla modellenmesi yapılmış olur. Burada $x(0) > 0$ ve $y(0) > 0$'dır.

Popülasyon dinamiğinde, gecikme terimi eklenerek daha gerçekçi modeller oluşturulmuştur. Bu tip modeller, gecikmeli popülasyon modelleri olarak adlandırılmaktadır. Literatürde gecikmeli av-avcı modelleri geniş yer tutmaktadır. May (1973), gecikmeli av-avcı sistemini,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= x(t)[r_1 - a_{11}x(t-\tau) - a_{12}y(t)] \\ \dot{y}(t) &= y(t)[-r_2 + a_{21}x(t) - a_{22}y(t)] \end{aligned} \tag{3.5}$$

Denklem (3.5) ile ortaya koymuş ve incelemiştir. Burada $x(t)$ ve $y(t)$ sırasıyla t zamanında av ve avcının popülasyon yoğunluğunu ifade etmektedir. $\tau \geq 0$ avın kendi türü içerisindeki zaman gecikmesidir. $r_1 > 0$ avın içsel büyüme oranını, $r_2 > 0$ avcının ölüm oranını gösterir. $a_{ij}(i, j = 1,2)$ parametrelerinin hepsi pozitif sabitlerdir.

Faria (2001)'de av-avcı modelinde iki farklı gecikme parametresi kullanmıştır. Birinci denklemde avcı popülasyon yoğunluğuna $\tau_1 > 0$ gecikme parametresini ve ikinci denklemde av popülasyon yoğunluğuna $\tau_2 > 0$ gecikme parametresini ekleyerek,

$$\dot{x}(t) = x(t)[r_1 - a_{11}x(t) - a_{12}y(t-\tau_1)] \tag{3.6}$$

$$\dot{y}(t) = y(t)[-r_2 + a_{21}x(t-\tau_2) - a_{22}y(t)]$$

(3.6) denklem takımını elde etmiştir. Burada Faria, pozitif denge noktasının kararlılığını incelemiştir. Yaptığı çalışmanın sonucunda Hopf çatallanmanın varlığını göstermiştir.

Song ve diğ. (2004)'de gecikmeli rekabet üzerine çalışmışlardır. Önerilen model,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= r_1 x(t)[1 - x(t) - ay(t-\tau_1)] \\ \dot{y}(t) &= r_2 y(t)[1 - bx(t-\tau_2) - y(t)] \end{aligned} \tag{3.7}$$

(3.7) denklemiyle tanımlanır. Denklemlerde τ_1 ve τ_2 olmak üzere iki farklı gecikme mevcuttur. $x(t)$ ve $y(t)$ ise birbiriyle rekabet halinde olan iki türün popülasyon yoğunluğudur. Bu araştırmada, pozitif denge noktasının kararlı olduğu, Hopf çatallanmasının varlığı, yönü ve kararlılığı detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Yan ve Li (2006)' da Denklem (3.5)'in ikinci denkleminde bulunan avcı popülasyon yoğunluğuna zaman gecikmesi τ parametresi ekleyerek,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= x(t)[r_1 - a_{11}x(t-\tau) - a_{12}y(t)] \\ \dot{y}(t) &= y(t)[-r_2 + a_{21}x(t) - a_{22}y(t-\tau)] \end{aligned} \tag{3.8}$$

Denklem (3.8) sistemini elde etmişlerdir. Sistemin tek pozitif denge noktası mutlak kararlı olduğunu bulmuşlardır. Bu denge noktasının kararlılığını değişip kararsız olduğu ve tekrar kararlı olduğunu saptamışlardır.

Yan ve Zhang (2008)'de Denklem (3.8) ile Denklem (3.6)'yi birleştirerek,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= x(t)[r_1 - a_{11}x(t-\tau) - a_{12}(t-\tau)] \\ \dot{y}(t) &= y(t)[-r_2 + a_{21}x(t-\tau) - a_{22}y(t-\tau)] \end{aligned} \tag{3.9}$$

Denklem (3.9) gecikmeli av-avcı sistemini elde etmişlerdir. Bu çalışmada lineerleştirilen sistemin pozitif denge noktası kararlı olarak bulunmuştur. Çatallanma parametresi olarak τ alınmış ve seçilen

çatallanma parametresi ile pozitif denge noktası kararlılığını kaybetmiş ve Hopf çatallanma oluşmuştur.

Xu ve diğ. (2011)'de av ve avcı popülasyon yoğunluklarına farklı iki gecikme parametresi ekleyerek ,

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= x(t)[r_1 - a_{11}x(t-\tau_1) - a_{12}y(t-\tau_2)] \\ \dot{y}(t) &= y(t)[-r_2 + a_{21}x(t-\tau_2) - a_{22}y(t-\tau_1)]\end{aligned} \tag{3.10}$$

Denklem (3.10)'u incelemişlerdir. $\tau_1 > 0$, av ve avcının gebelik süresi gösterir. $\tau_2 > 0$, sistem (3.11)'in ilk denkleminde avcının avlanmasındaki gecikmeyi, sistem (3.10)'un ikinci denklemindeki τ_2 ise avcının olgunlaşma süresindeki gecikmeyi ifade etmektedir. Bu çalışmada da sistemin kararlılığı ve Hopf çatallanmada oluşan periyodik çözümlerin kararlılığı incelenmiştir.

3.2. İçten Yanmalı Motor

İçten yanmalı motorların kontrolünde, ortalama tork üretim modeli sık kullanılmaktadır. Bu modelde krank milinin devri (dönüşü) hareket denklemleri tarafından aşağıdaki gibi modellenir.

$$J\dot{\omega}(t) = T_i(t-\tau_i) - T_f(t) - T_{load}(t) \tag{3.11}$$

Burada, T_i motor tarafından üretilen torktur ve motor devrindeki gecikmelerden dolayı τ_i kadar gecikir. Bu gecikmeler yakıt-hava karışımından, ateşleme gecikmesinden ve silindir basınç kuvveti yayılımı gibi örneklerden kaynaklanmaktadır. T_f sürtünmeyi, T_{load} yükü, J atalet momentini ve ω krank milinin açısal hızını belirtmektedir. Geri beslemeli kontrol T_i torkunu manipüle etmek için uygulanır. Kontrolör dinamikleri aşağıdaki denklemler tarafından yönetilir.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), \omega(t)) \tag{3.12}$$

$$T_i(t) = h(x(t), \omega(t)) \tag{3.13}$$

Denklem (3.11) ve (3.13) kullanılarak, kapalı çevrim sistemi,

$$\dot{\omega}(t) = \frac{1}{j}[h\big(x(t-\tau_i), \omega(t-\tau_i)\big) - T_f(t) - T_{load}(t)] \tag{3.14}$$

$$\dot{x}(t) = f(x(t), \omega(t)) \tag{3.15}$$

Denklem (3.14) ile tanımlanır. Burada gecikme, geri beslemeden kaynaklanmaktadır. Yani sistemin yapısından dolayı geribesleme geciktirilir. Benzer etkilere sahip gecikmelerin diğer bir tipi ölçümlerde yapılan gecikmelerden kaynaklanabilir. Her iki durumda da gecikme arzu edilmez. Çünkü, sistemin performansını düşürebilir hatta sistemi kararsız hale getirebilir (Gu vd., 2003).

3.3. Tek Hücreli Zaman Gecikmeli Hücresel Sinir Ağı

Hücresel sinir ağı (HSA), nöronların çok boyutlu dizilimini ve hücreler arası yerel bağlantı özelliklerini sağlayan yapay sinir ağıdır. Hücresel sinir ağları, 1988 yılında sinir sistemindeki nöronların birbirlerine olan bağlantılarına yoğunlaşan iki bilim adamı Chua ve Yang (1988) tarafından önerilmiştir. Chua ve Yang'ın (1988) çalışmaları hücresel sinir ağlarının model ve teorisinin temelini oluşturmaktadır. Hücresel sinir ağları belirli bir şablon yapısına sahiptir ve parçalı-doğrusal aktivasyon fonksiyonunun kullanıldığı yapay sinir ağlarının özel bir sınıfıdır. Hücresel sinir ağlarının elektronik uygulamalarında zaman gecikmesi kaçınılmazdır. Lu ve diğ. (1998) tarafından ele alınan modelde zaman gecikmesi mevcuttur ve zaman gecikmeli hücresel sinir ağı (ZGHSA) tek hücreli bir yapıya sahiptir. Önerilen model,

$$\dot{x}(t) = -ax + bf[x(t-\tau)] \tag{3.16}$$

$$f(x) = 2(|x+1| - |x-1|) - \frac{3}{2}\left(\left|x+\frac{4}{3}\right| - \left|x-\frac{4}{3}\right|\right) \tag{3.17}$$

şeklinde tanımlanır. Burada a, b parametreler, τ zaman gecikmesi ve $f(x)$ ise parçalı doğrusal yapıdaki tek simetrik bir fonksiyondur. Model (3.16), ZGHSA'nda bir hücre denklemi olarak incelenebilir. Bu denklem, GFDD'dir ve fonksiyonel diferansiyel denklemlerin özel bir çeşididir. Denklemin çözüm uzayı sonsuz boyutludur.

4. ZAMAN GECİKMELİ SİSTEMLERİN BENZETİMLERİ

Bu bölümde, Bölüm 3'te bahsedilen zaman gecikmeli sistemlerden bazılarına ait Matlab/Simulink ortamında elde edilen benzetim sonuçları verilecektir. Benzetimleri gerçekleştirilecek sistemler av-avcı popülasyonu ve tek hücreli zaman gecikmeli hücresel sinir ağı modelidir.

Farklı sistem parametreleri ve zaman gecikmesi değerlerine göre sistemlerin benzetimleri gerçekleştirilip dinamik davranışları incelenecektir. Zaman gecikmesi değerinin ve sistem parametrelerinin sistemin dinamik davranışını nasıl etkilediği nümerik sonuçlarla gösterilecektir. Nümerik sonuçlarda sistemlerin faz diyagramları ve zaman cevapları elde edilecektir.

Sistemler Matlab/Simulink ortamında modellenmiş ve Matlab toolbox içinde gömülü olan "*fifth order Runge-Kutta ordinary differential solver*" kullanılarak nümerik bir şekilde çözülmüştür. Zaman gecikmeli sistemler, sonsuz boyuta sahip olduklarından benzetimler $[-\tau, 0]$ aralığında bir başlangıç şartı belirtilerek gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde solver olarak "*ode45"* seçilmiştir. Maksimum adım boyutu 10^{-2} için nümerik sonuçlar elde edilmiştir.

4.1. Av-Avcı Popülasyonunun Benzetimi

Bu kısımda, Xu ve diğ. (2011) tarafından verilen av -avcı popülasyonun Matlab/Simulink ortamında nümerik sonuçları incelenecektir. Av-avcı popülasyon yoğunlukları,

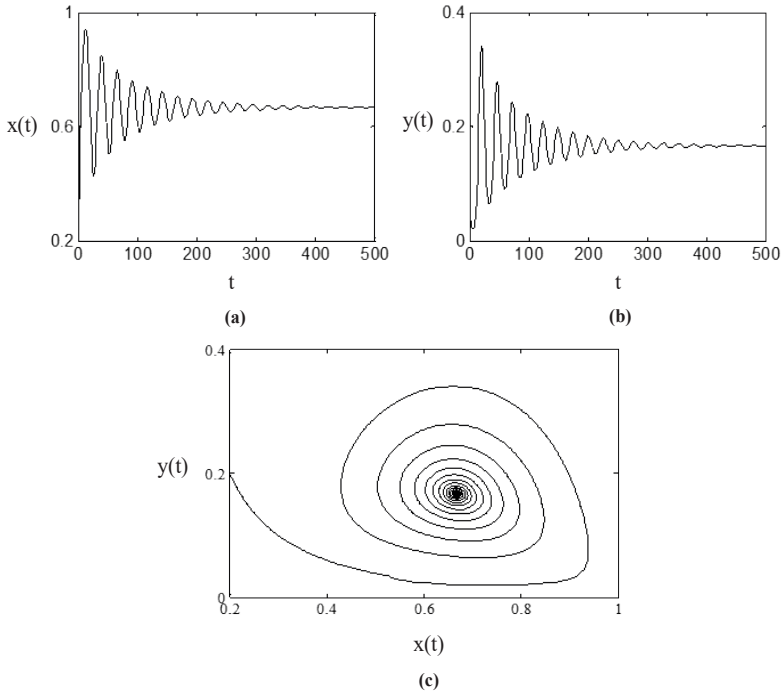
$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= x(t)[r_1 - a_{11}x(t-\tau_1) - a_{12}y(t-\tau_2)] \\ \dot{y}(t) &= y(t)[-r_2 + a_{21}x(t-\tau_2) - a_{22}y(t-\tau_1)] \end{aligned} \tag{4.1}$$

Denklem (4.1) şeklinde tanımlanmaktadır. $\tau_1 > 0$ av ve avcının gebelik süresini göstermektedir. $\tau_2 > 0$, sistem (4.1)'in ilk denkleminde avcının avlanmasındaki gecikmeyi, sistem (4.1)'in ikinci denklemindeki τ_2 ise avcının olgunlaşma süresindeki gecikmeyi ifade etmektedir.

Denklem (4.1)'in farklı zaman gecikmesi değerleri için benzetimi gerçekleştirilip dinamik davranışları ilk önce Denklem (4.1)'de $\tau_1 = 0$ alınarak sistem incelenecektir. Zaman gecikmesi $\tau_1 = 0$ iken sistem parametreleri $r_1 = 0.5$, $r_2 = 0.5$, $a_{11} = 0.5$, $a_{12} = 1$, $a_{21} = 1$ ve $a_{22} = 1$ alınarak,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= x(t)[0.5 - 0.5x(t) - y(t-\tau_2)], \\ \dot{y}(t) &= y(t)[-0.5 + x(t-\tau_2) - y(t)] \end{aligned} \tag{4.2}$$

Denklem (4.2) formuna dönüşür. Zaman gecikmesi τ_2'nin farklı değerlerine göre Denklem (4.2)'nin dinamik davranışları Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Denklem (4.1)'de tanımlanan sistemin $\tau_1 = 0$ ve $\tau_2 = 3$ iken **(a)** avın zamana göre değişimi **(b)** avcının zamana göre değişimi **(c)** av-avcı faz diyagramı (Başlangıç şartları $x_0(t) = 0.2$ ve $y_0(t) = 0.2$ olarak alınmıştır.)

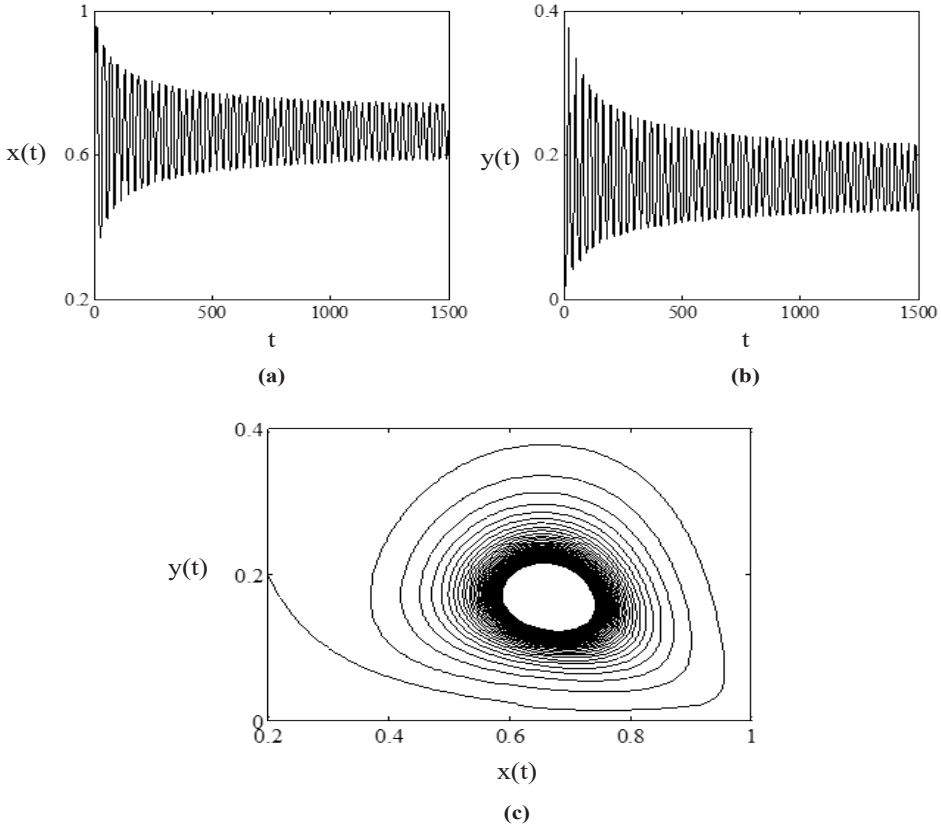
Şekil 4.1'de sistem parametreleri $r_1 = 0.5, r_2 = 0.5,\ a_{11} = 0.5, a_{12} = 1,$ $a_{21} = 1$ ve $a_{22} = 1$ iken $\tau_1 = 0$ ve $\tau_2 = 3$ olduğu durumda sistemin zaman cevabı ve faz uzay diyagramı görülmektedir. Şekil 4.1 (a)'da avın zamana göre Şekil 4.1 (b)'de ise avcının zamana göre değişimi çizilmiştir. Şekil 4.1 (c)'de ise avın avcıya göre değişimi çizilerek faz diyagramı elde edilmiştir. Şekil 4.1'den de görüldüğü üzere asimptotik bir davranış söz konusudur. Bu yapıda av-avcı popülasyonu zaman içinde dengelenecektir.

Şekil 4.2'de sistem parametreleri $r_1 = 0.5, r_2 = 0.5,\ a_{11} = 0.5, a_{12} = 1,$ $a_{21} = 1$ ve $a_{22} = 1$ iken $\tau_1 = 0$ ve $\tau_2 = 3.7$ olduğu durumda sistemin zaman cevabı ve faz uzay diyagramı görülmektedir. Şekil 4.2 (a)'da avın zamana göre Şekil 4.1 (b)'de ise avcının zamana göre değişimi çizilmiştir. Şekil 4.2 (c)'de ise avın avcıya göre değişimi çizilerek faz diyagramı elde edilmiştir. Şekil 4.2'den de görüldüğü üzere Hopf çatallanma oluşmaktadır. Yani av-avcı popülasyonunda sabit bir frekanslı dalgalanmalar oluşacaktır.

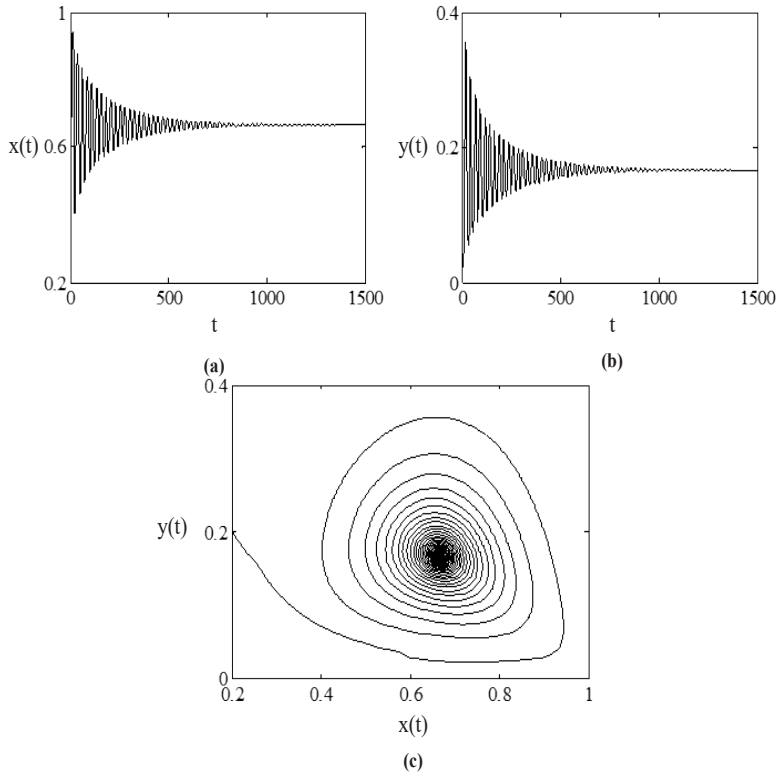
Denklem (4.1)'de $\tau_1 = 0.5$ ve $\tau_2 = 3$ alınarak sistemin benzetimi gerçekleştirilecektir. Sistem parametreleri $r_1 = 0.5$, $r_2 = 0.5$, $a_{11} = 0.5$, $a_{12} = 1$, $a_{21} = 1$ ve $a_{22} = 1$ alınarak Denklem (4.1),

$$\dot{x}(t) = x(t)[0.5 - 0.5x(t - 0.5) - y(t - 3)]$$
$$\dot{y}(t) = y(t)[-0.5 + x(t - 3) - y(t - 0.5)] \quad (4.3)$$

Denklem (4.3) formuna dönüşür. Denklem (4.3)'ün nümerik sonuçları Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Denklem (4.1)'de tanımlanan sistemin $\tau_1 = 0$ ve $\tau_2 = 3.7$ iken **(a)** avın zamana göre değişimi **(b)** avcının zamana göre değişimi **(c)** av-avcı faz diyagramı (Başlangıç şartları $x_0(t) = 0.2$ ve $y_0(t) = 0.2$ olarak alınmıştır.)



Şekil 4.3. Denklem (4.1)'de tanımlanan sistemin $\tau_1 = 0.5$ ve $\tau_2 = 3$ iken **(a)** avın zamana göre değişimi **(b)** avcının zamana göre değişimi **(c)** av-avcı faz diyagramı (Başlangıç şartları $x_0(t) = 0.2$ ve $y_0(t) = 0.2$ olarak alınmıştır.)

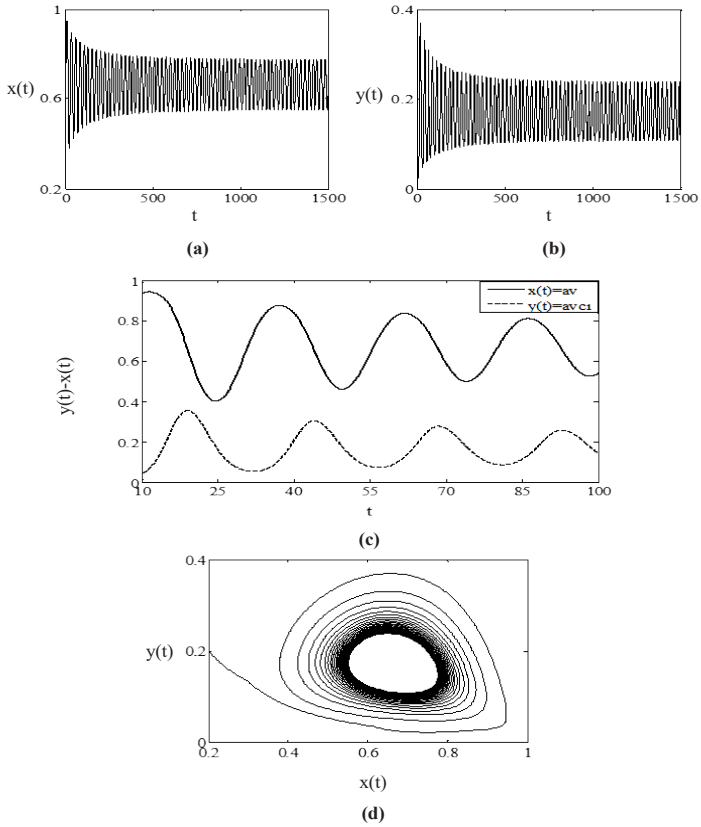
Şekil 4.3'te sistem parametreleri $r_1 = 0.5, r_2 = 0.5$, $a_{11} = 0.5, a_{12} = 1$, $a_{21} = 1$ ve $a_{22} = 1$ iken $\tau_1 = 0.5$ ve $\tau_2 = 3$ olduğu durumda sistemin zaman cevabı ve faz uzay diyagramı görülmektedir. Şekil 4.3'te avın zamana göre Şekil 4.3 (b)'de ise avcının zamana göre değişimi çizilmiştir. Şekil 4.3 (c)'de ise avın avcıya göre değişimi çizilerek faz diyagramı elde edilmiştir. Şekil 4.3'ten de görüldüğü üzere asimptotik kararlı bir davranış söz konusudur.

Denklem (4.1)'de $\tau_1 = 0.8$ ve $\tau_2 = 3$ alınarak sistemin benzetimi gerçekleştirilecektir. Sistem parametreleri $r_1 = 0.5$, $r_2 = 0.5$, $a_{11} = 0.5$, $a_{12} = 1$, $a_{21} = 1$ ve $a_{22} = 1$ alınarak Denklem (4.1),

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= x(t)[0.5 - 0.5x(t - 0.5) - y(t - 3)] \\ \dot{y}(t) &= y(t)[-0.5 + x(t - 3) - y(t - 0.5)] \end{aligned} \tag{4.4}$$

Denklem (4.4) formuna dönüşür. Denklem (4.4)'ün nümerik sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmektedir.

Şekil 4.4'te sistem parametreleri $r_1 = 0.5, r_2 = 0.5,\ a_{11} = 0.5, a_{12} = 1,$ $a_{21} = 1$ ve $a_{22} = 1$ iken $\tau_1 = 0.8$ ve $\tau_2 = 3$ olduğu durumda sistemin zaman cevabı ve faz uzay diyagramı görülmektedir. Şekil 4.4 (a)'da avın zamana göre, Şekil 4.4 (b)'de ise avcının zamana göre değişimi ve Şekil 4.4 (c)' de ise av ve avcının zamana göre değişimi aynı garfikte çizilmiştir. Şekil 4.4 (d)'de ise avın avcıya göre değişimi çizilerek faz diyagramı elde edilmiştir. Şekil 4.4'ten de görüldüğü üzere Hopf çatalanma oluşmaktadır. Av-avcı popülasyonu belirli bir aralık ve zaman periyodunda artıp azalmaktadır. Dikkat edilirse tümüyle yok olmayan damgasal bir ilişki sergiledikleri görülecektir.



Şekil 4.4. Denklem (4.1)'de tanımlanan sistemin $\tau_1 = 0.8$ ve $\tau_2 = 3$ iken **(a)** avın zamana göre değişimi **(b)** avcının zamana göre değişimi **(c)** av-avcı popülasyonunun zamana göre değişimi **(d)** av-avcı faz diyagramı (Başlangıç şartları $x_0(t) = 0.2$ ve $y_0(t) = 0.2$ olarak alınmıştır.)

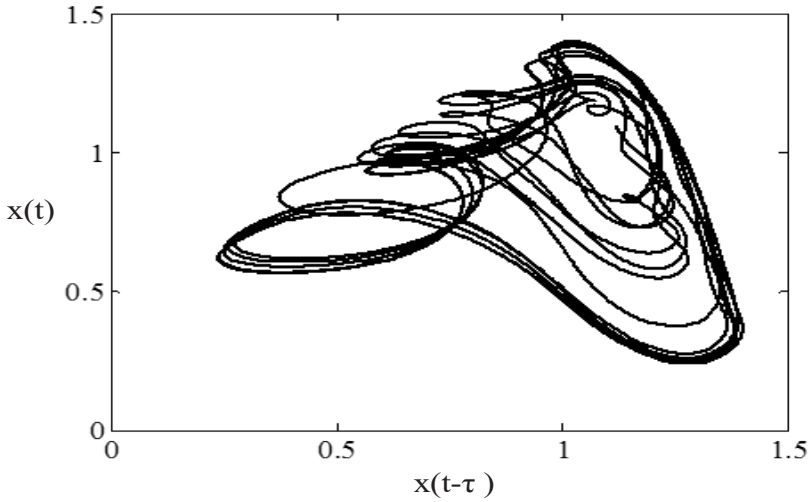
4.2. Tek Hücreli Zaman Gecikmeli Hücresel Sinir Ağının Benzetimi

Bu örnekte Lu ve diğ. (1998) tarafından verilen tek hücreli zaman gecikmeli hücresel sinir ağının dinamik davranışlarını gösteren benzetim sonuçları incelenecektir. Tek hücreli yapıya sahip zaman gecikmeli hücresel sinir ağı,

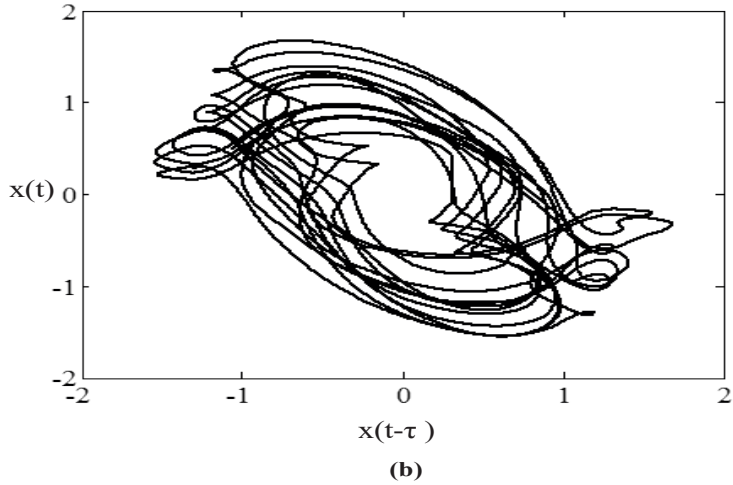
$$\dot{x}(t) = -ax + bf[x(t-\tau)]$$
$$f(x) = 2(|x+1| - |x-1|) - \frac{3}{2}\left(\left|x+\frac{4}{3}\right| - \left|x-\frac{4}{3}\right|\right) \tag{4.5}$$

Denklem (4.5) ile tanımlanır. Burada a, b sistem parametreleri, τ zaman gecikmesi, f ise parçalı doğrusal yapıda olan tek simetrik bir fonksiyondur.

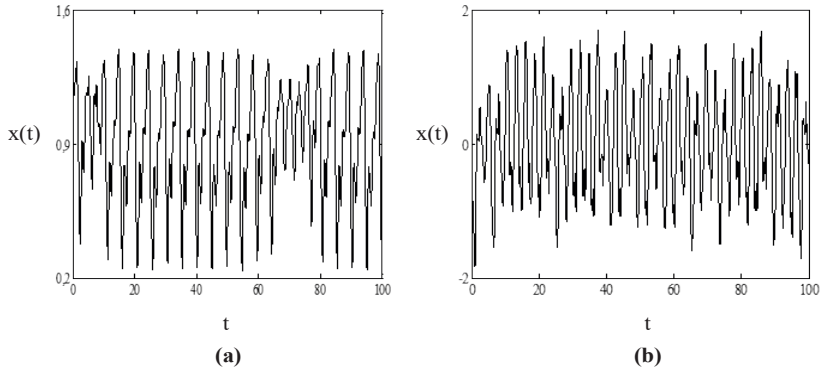
Zaman gecikmesi $\tau = 1.0$ ve $a = 2.0$ iken $b = 3$ ve $b = -5$ sistem parametrelerinde birbirinden farklı kaotik davranışlar gözlemlenmiştir (Lu ve diğ., 1998). Şekil 4.5'te $x(t) - x(t-\tau)$ düzleminde iki tip kaotik çekici ve Şekil 4.6'da ise sistemin zaman cevabı elde edilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre Denklem (4.5) ile ifade edilen tek hücreli ZGHSA'nda kaosun varlığı görülmektedir.



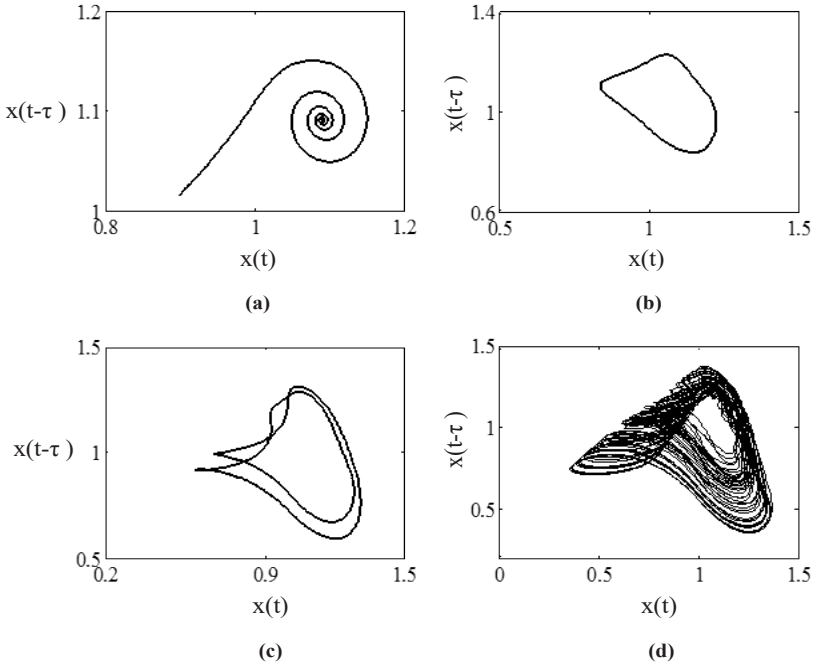
(a)



Şekil 4.5. Tek hücreli ZGHSA' nın $\tau = 1.0$ iken **(a)** $a = 2.0, b = 3.0$ **(b)** $a = 2.0, b = -5.0$ için faz diyagramları (Başlangıç şartı olarak $x_0(t) = 0.9$ alınmıştır.)



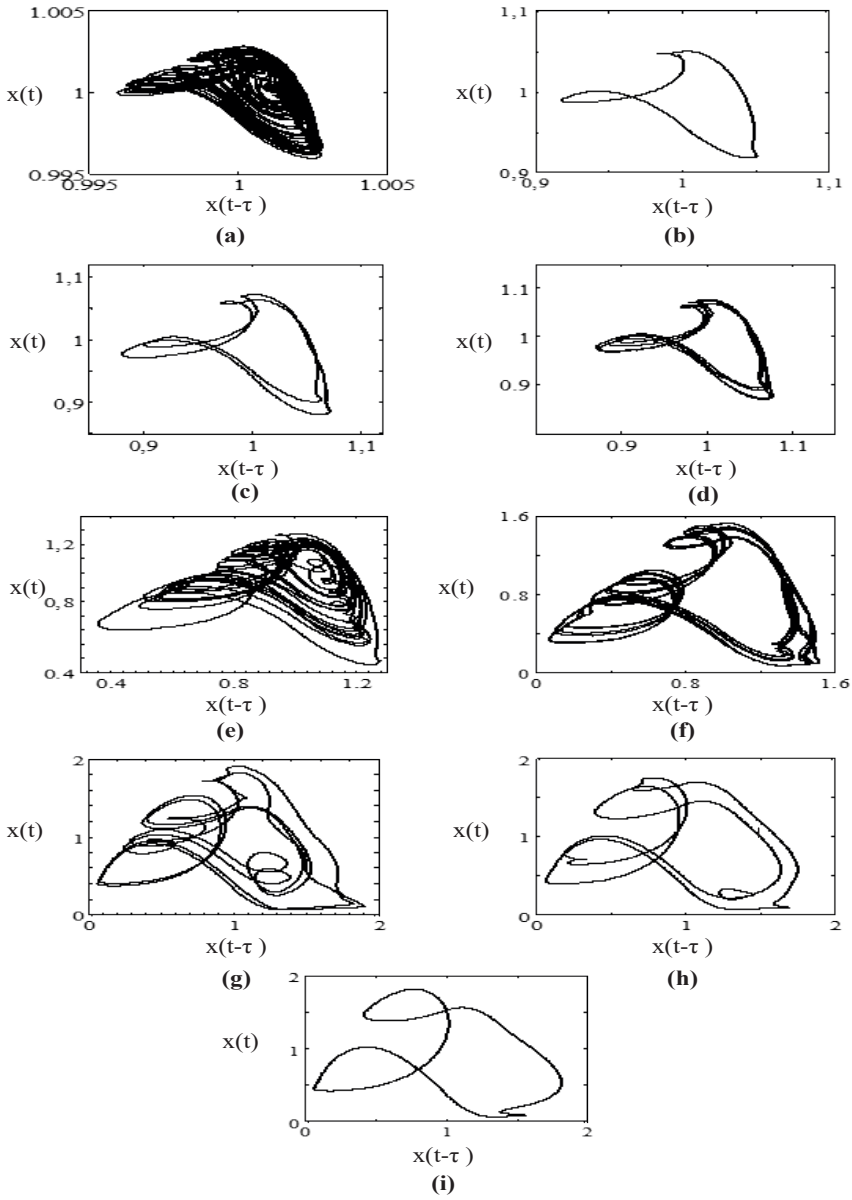
Şekil 4.6. Tek hücreli ZGHSA' nın $\tau = 1.0$ iken **(a)** $a = 2.0, b = 3.0$ **(b)** $a = 2.0, b = -5.0$ için zaman cevapları (Başlangıç şartı $x_0(t) = 0.9$ olarak alınmıştır.)



Şekil 4.7. Tek hücreli ZGHSA nın $a = 2.0$, $b = 3.0$ ve $b = 3$ iken farklı zaman gecikmesi τ değerleri için sistem yörüngeleri: **(a)** $\tau = \mathbf{0.15}$ için kararlı **(b)** $\tau = 0.45$ için limit çevrim **(c)** $\tau = 0.5\mathbf{5}$ için limit çevrim **(d)** $\tau = \mathbf{0.8}$ için kaotik davranış (Başlangıç şartı $x_0(t) = 0.9$ olarak alınmıştır.)

Şekil 4.7'de sistem parametreleri $a = 2.0$ ve $b = 3.0$ $a = 2.0$ iken farklı zaman gecikmesi değerleri için sistemin dinamik davranışı gösterilmektedir. Şekil 4.7 (a)'da $\tau = 0.15$ için sistem yörüngesi azalarak denge noktasında kararlı olmaktadır. Şekil 4.7 (b)'de $\tau = 0.45$ için bir limit çevrim görülmektedir. Şekil 4.7 (c)'de $\tau = 0.55$ için çift periyotlu bir limit çevrim görülmektedir. Şekil 4.7 (d)'de $\tau = 0.8$ için ise bir kaotik davranış söz konusudur.

Şekil 4.8'de $a = 3.0$ ve $\tau = 1.0$ iken b parametresinin farklı değerleri için bir dizi faz diyagramları gösterilmektedir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi $b > a$ olduğunda (ancak a yeterince büyük olmak şartıyla ($a > 2.5$) sistem hemen çok küçük genlikli bir kaosa girmektedir. b'nin artması genliğin büyümesine sebep olmaktadır. b yeterince büyük olduğu zaman ($a = 3.0$, $b > 6.1$ gibi) sistem kaostan çıkmaktadır ve periyodik davranışlar göstermektedir.



Şekil 4.8. Tek hücreli ZGHSA'nın $a = 3.0$ ve $\tau = 1.0$ iken pozitif b parametresinin farklı değerleri için bazı dinamik davranışları: **(a)** $b = 3.01$ çok küçük genlikli kaotik osilasyon **(b)** $b = 3.19$ bir periyot **(c)** $b = 3.25$ iki periyot **(d)** $b = 3.27$ dört periyot **(e)** $b = 4.0$ daha büyük genlikli kaos **(f)** $b = 5.0$ kaos **(g)** $b = 6.35$ dört periyot **(h)** $b = 6.7$ iki periyot **(i)** $b = 7.1$ bir periyot (Başlangıç şartı $x_0(t) = 0.9$ olarak alınmıştır.)

5. SONUÇLAR

Gerçek dünyada birçok olayda zaman gecikmesi, sistem davranışını belirleyen önemli bir kavramdır ve bu gecikmenin sistem üzerindeki etkisi büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle, bu tür sistemlerin matematiksel modellenmesi sürecinde zaman gecikmesi dikkate alınır. Dinamik sistemlerin zaman gecikmesi içermesi durumunda gerçeğe uygun matematiksel modelleri oluşturulurken, genellikle gecikmeli diferansiyel denklemlerden faydalanılır. Bu denklemler, sistemdeki gecikmeyi daha doğru bir şekilde yansıtarak, sistemin dinamiklerini etkileyen zaman faktörünü hesaba katar. Bu tür sistemlerde zaman gecikmesi her zaman bir parametre olarak bulunur ve bu parametrenin sistemin genel performansına olan etkisi önemli bir araştırma konusudur. Bu bağlamda, sistem üzerinde meydana gelen parametre değişikliklerinin zaman gecikmesi ile ilişkisi, sistemin kararlılığı, tepki hızı ve diğer dinamik özellikleri üzerindeki etkilerin anlaşılması önemlidir. Bu şekilde elde edilen bilgiler, gecikmeli sistemlerin daha etkili bir şekilde tasarlanmasına ve yönetilmesine katkı sağlayabilir.

Bu çalışmada, fonksiyonel diferansiyel denklemlerin bir alt sınıfı olan gecikmeli diferansiyel denklemler ve türleri üzerinde durulmuştur. Matematik modelleri gecikmeli diferansiyel denklem kullanılarak oluşturulan bazı zaman gecikmeli sistemlere örnek verilmiştir. Bu sistemlerden av-avcı popülasyon modelinin ve tek hücreli zaman gecikmeli hücresel sinir ağı modelinin Matlab/Simulink ortamında benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Benzetimi gerçekleştirilen sistemler, Matlab toolbox içinde gömülü olan “fifth order Runge-Kutta ordinary differantial solver” kullanılarak nümerik bir şekilde çözülmüştür. Bu sistemler sonsuz boyuta sahip olduklarından $[-\tau, 0]$ aralığında başlangıç şartı belirtilerek benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Benzetimi gerçekleştirilen sistemlerin farklı sistem parametreleri ve zaman gecikmesi değerleri için faz diyagramları ve zaman cevapları elde edilip dinamik davranışları incelenmiştir. Sistemlerin parametrelere bağlı olarak asimptotik kararlı, limit çevrim ve kaotik davranış türleri gösterdiği saptanılmıştır.

KAYNAKLAR

Chua, L.O. ve Yang, L. (1988), *Cellular Neural Networks: Theory*, IEEE Transaction on Circuits and Systems, Vol 35,No.10, 1257-1272.

Çetintaş, G. (2016). *Zaman gecikmeli sistemlerin kararlılık ve çatallaşma analizi/Stability and bifurcation analysis of time delay systems*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Faria, T. (2001), *Stability and bifurcation for a delayed predator-prey model and the effect of diffusion*, J.Math. Anal. Appl. 254 433-463.

Gontkovıc, D. & Fonod, R. (2011), *Control and Stability Analyzing of the Time-Delay Systems with time-varying delays*, Acta Electrotechnica et Informatica, Versita.

Gu, K., Kharittonov, V. L. & Chen, j. (2003), *Stability of Time-Delay Systems*, Springer, Boston.

Hale, J. K. & Lunel, S. M. V. (1991), *Introduction to Functional Differential Equations*, App. Math. Sciences, 99, Springer – Verlag, New York.

Kolmanovskii, V.B., Niculescu, S-I. ve Gu, K. (1999), *Delay Effects on Stability: A Survey*, Conference on Decision & Control, USA.

Lakshmanan, M. & Senthilkumar, D. V. (2011), *Dynamics of Nonlinear Time-Delay Systems*,Springer.

Lotka, A. J. (1925). *Elements of physical biology*. Williams & Wilkins.

Lu, H., He Y. and He, Z. (1998), *A Chaos Generator: Analysis of Complex Dynamics of a Cell Equation in Delayed Cellular Neural Networks*, IEEE Trans. CAS-I, 45, 178-181.

Mahmoud, M. S. (2000), *Robust Control and Filtering for Time-delay Systems*, Control Engineering Series, Marcel Dekker, Inc., New York.

May, R. M. (1973), *Time delay versus stability in population models with two and three trophic levels*, Ecology 4 315-325.

Schoen. G. M. (1995), *Stability and Stabilization of Time-Delay Systems*, PhD Dissertation, ETH, Zurich.

Song,Y., Han, M. & Peng, Y. (2004), *Stability and Hopf bifurcations in a competitive Lotka-Volterra system with two delays*, Chaos, Solitons & Fractals, 22,1139-1148.

Uçar, A. (2002), *A Prototype Model for Chaos Studies*, Int J. Eng. Sci., **40**, 251-258.

Uçar, A. (2003), *On the Chaotic Behavior of a Prototype Delayed Dynamical System*,
Chaos, Solitons and Fractals, **16**, 187-194.

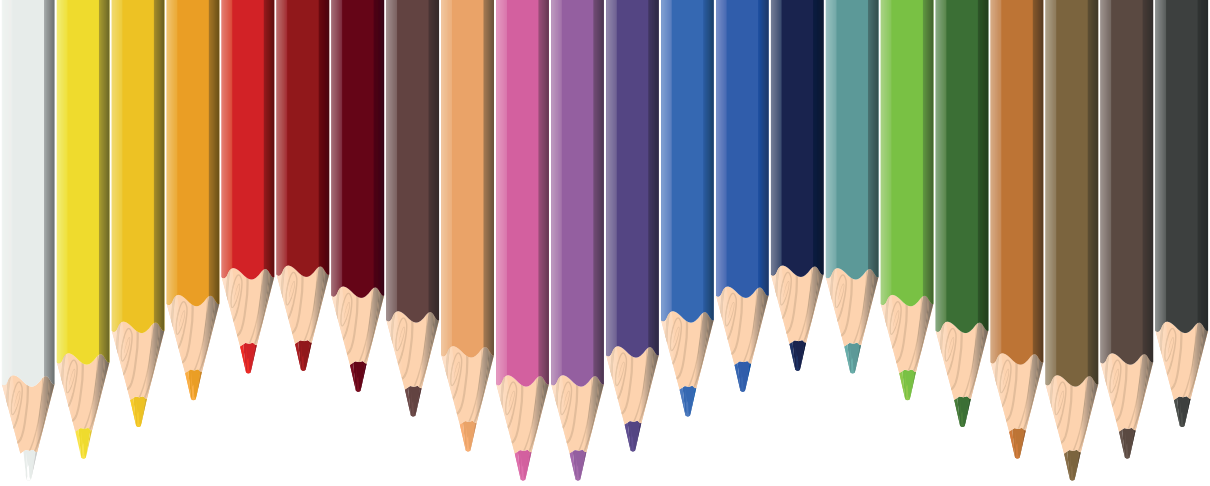
Xu, C., Liao, M. & He, X. (2011), *Stability and Hopf Bifurcation analysis for a Lotka-Volterra predator-prey models with two delays*, *Int. J. Appl. Math. Comput*, 97- 107.

Volterra, V. (1926). *Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically*. Nature, 118(2972), 558-560.

Yan, X. P. & Li, W. T. (2006), *Hopf bifurcation and global periodic solutions in a delayed predator-prey system*, Appl. Math. Comput. 177, 427-445.

Yan, X. P. & Zhang, C. H. (2008), *Hopf bifurcation in a delayed Lotka-Volterra predator-prey system*, Nonlinear Anal. :Real World Appl. 9, 114-127.

Zhong, Q-C. (2006), *Robuts Control of Time Delay Systems*, Springer, Liverpool.



Bölüm 2

ÇOK MODLU ULAŞTIRMA VE YÜKSEK HIZLI TREN PLANLAMASI

Mehmet Çağrı KIZILTAŞ[1]

1 İstanbul Ticaret Üniversitesi
mckiziltas@ticaret.edu.tr

Giriş

Bu tarz çalışmalarla, dinamik çok düzeyli çok unsurlu modal boyutlandırma problemi sonuçlarının bir ulaştırma sistemi planlama problemine nasıl aktarılacağını ortaya koymak amaçlanmaktadır. Özellikle, güzergâhlar, ulaştırma araçları ve hizmet kalitesinin sözleşme aşamasında sabitlendiği kabulüyle planlama probleminin üretimi dikkate alınmıştır. Ulaştırma sistemi teknolojisinde, örneğin çok modlu olabilir, banliyö otobüsleri ve yerel trenleri birlikte bulundurabilir gibi herhangi bir varsayım yapılmamıştır (1).

Önerilen model, yolcu talebinin gün içerisinde önemli oranda değiştiği (örneğin yolcu çoğunun düzenli ev-iş yolculukları yaptığı durumlarda dünün belirli periyotlarında yoğunlaşmanın olması gibi) yerel ağlara daha iyi uygulanabilir. Dolayısıyla zaman çizelgelerinin periyodik (trenlerin periyodik planlama durumları için, ayrı bir detaylandırma söz konusudur) bir kısıtlılığı olmadığı kabul edilmektedir (2).

İşletmecinin ana hedefi; maliyetleri düşürürken mümkün olduğunca çok kullanıcıya hizmet verebilmektedir. Bu bağlamda; sözü edilen transfer koordinasyon probleminin maksimum izin verilebilir ve ekonomik açıdan elverişli hızlarda bütün ulaştırma araçlarında (UA) ortaya çıktığı kabulüyle karşılaşılmaktadır.

Transfer koordinasyon problemi; bağlantı duraklarında farklı hatlardaki işletim boyunca koordinasyonun garanti edilmesi bir zaman çizelgesi tanımlama çabasına dayanmaktadır. Literatürde bu gibi bir problem aşağıdaki iki yaklaşıma göre otobüs çizelgeleme konusuyla ilgilidir:

· Sadece özel olarak belirlenmiş bir bağlantı noktasındaki eş zamanlılığı empoze eden zamanlanmış transfer yaklaşımı

· Doğrudan bağlantılı hatlar boyunca eş zamanlılık yoksunluğunu cezalandıran bir amaç fonksiyonunu minimize eden transfer optimizasyon yaklaşımı

İlk yaklaşım; hatların bir ana ya da besleyici sistemi gibi basit yapılı bir ağa uygulandığında, önemli sonuçlar doğurmaktadır. Diğer taraftan ikincisinin ise uygulaması genellikle oldukça zordur. Transfer koordinasyon probleminin çözümü için önemli sonuçlar raporlanırken periyodik cetveller dikkate alınmıştır (3). Bu durumda problem matematikteki karmaşıklık problemi kadar zor bir hal almakta ve sabit bir hizmet talebi tarafından karakterize edildiğinden bu tarz çalışmalardaki özel duruma bağlı olarak dikkate alınabilir. Özellikle periyodik problem hiyerarşik bir şekilde çözülebilir, başlangıç olarak hizmet talebi oranı hizmet sıklıklarının hesaplanmasında kullanılabilmekte ve ardından koordinasyon problemi ayrıca çözülmektedir (4).

Bu tarz çalışmalarda, teorik olarak langraj yaklaşımıyla çözülmüş olan

bir model ortaya konulmaktadır. Sonuç modeli, gerçek örnek durumlarda langraj çarpanının güncellenmesine dayalı iteratif yaklaşımla çözüm için oldukça büyük bir boyuta ulaşmasına karşın, langraj çarpanının ekonomik bir yorumu önerilmiş olup böylelikle optimum değerler hesaplanmıştır. Takibinde ise sezgisel yaklaşım önerilmektedir. Çözüm prosedürü yapıcıdır ve bir zaman noktası için tekil bir hat planlamakta, her bir adımda mümkün olduğunca önceki kararları yeniden optimize etmekte ya da düzeltmektedir (5). Her bir hat belirli bir ulaştırma güzergâhı için grup ölçeklendirmesi ve sevkiyat arasındaki benzerliklerden faydalanan bir alt programa göre planlanmaktadır. Bu bağlamda bu tarz çalışmalarda çok düzeyli envanter sistem için önerilen yaklaşımla langraj bulguları arasında benzerlikler bulunabilmektedir (6).

Bunun takibinde dikkate alınan problem şekilsel olarak belirlenmektedir. Ardından her bir hat için ayrı ayrı zaman çizelgesinin hesaplanmasına imkân veren langraj temelli bir sezgisel yaklaşım uygulanmıştır. Sonrasında tekil bir hattın planlanma problemiyle yüzleşilmiş olup genel bir ağ planlanmasında pratik bir zaman çizelgesi algoritması önerilmiştir. Son olarak çeşitli sayısal sonuçlar raporlanmış ve sonuçlar ortaya konmuştur (7).

Problem Çözümü

Bu aynı ulaştırma aracıyla (UA) tek yönde iki terminal istasyonlu ulaştırma ağıyla bağlanan bir güzergâh olarak ele alınabilir. Benzer şekilde karşıt yönlerdeki iki terminal istasyonunu bir karşılıklı hat çift bağlamaktadır. Bu bağlamda; farklı hatlardan meydana gelen bir ulaştırma sistemi için zaman çizelgesi tanımıyla karşılaşılmaktadır. Özellikle, zaman aralığı $[T_1, T_f]$olarak tanımlanmış olan pik periyotlara odaklanılmış ve pik dışı periyotlar ya da gece saatleri boyunca ulaştırma araçlarının (UA) verili düzenli bir aralıktaki hizmet bazlı zaman çizelgelendirmesine tabi tutulduğu kabulü yapılmıştır (8).

Kullanıcılar; örneğin okullardan, işyerlerinden, istasyonlardan çıkan insanlar gibi toplanma zamanlı grup (PTO) ile okullara, işyerlerine, istasyonlara erişen insanlar gibi dağıtım zamanlı grup (DTO) olarak ayrılmaktadır. Bir PTO kullanıcı verili bir talep toplanma süresinden önce taşınamaz ve mümkün olan en uygun sürede varış noktasına ulaştırılmalıdır (9). Diğer taraftan bir DTO kullanıcısı da verili bir talep dağıtım süresinden öne dağıtılamaz ve kalkış noktasından olabildiğince beklemesiz alınmalıdır. Buraya kadar sunulan argümanlar ışığında, imkân dâhilindeki bir performans indeksi aşağıdaki içermelidir:

· İşletmeci maliyetleri bir ilk yaklaşım olarak her bir sefer için sabit bir maliyet olarak dikkate alınabilir (bu, hatta kullanılan ulaştırma araçlarının sayısına bağlı bir maliyet gibidir)

· Yolcu bekleme maliyetleri bir ilk yaklaşım olarak hizmet kalitesine bağlı maliyetleri ortaya koymaktadır, sistemdeki yolcuların harcadığı zamana göre oranlanarak dikkate alınır ve hem kontrat düzeyinde kalite olarak neyin sabitleneceğini ve daha sonra ele alınacağı üzere kullanıcı kayıp ihtimallerini ortaya koyacağı kabulü yapılabilir

Bu tarz çalışmalarda kullanıcı bekleme maliyetlerinin sistemde harcamaları gereken zamana bağlı olmaksızın toplu taşıma hizmetini kullanabilecek bütün potansiyel kullanıcılara bağlıdır (10). Bu gibi bir indeks, modellemeyle ilgili nedenlerden dolayı toplam hizmet götürülen yolcu sayısına tercih edilmektedir: bir hizmet sağlama fonksiyonu olarak güncel yolcu sayısını açıklayan bir yasa, yaklaşık olarak tanımlanabildiğine göre, sistemdeki bir yolcu tarafından harcanan zaman (sistemdeki yolcu zamanı, PTS) kısaltılabildiği ve potansiyel kullanıcının toplu taşıma hizmetini kullanma ihtimalini arttırdığı genel olarak kabul edilmektedir (11). Ayrıca bu gibi bir performans indeksinin yolcuların güncel sayısının iyi bir göstergesi olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca PTS, maksimum kabul edilebilir kullanıcı bekleme süre kısıtlarının ortaya konması gerekliliğini de ortadan kaldırmaktadır. Son olarak PTS; sadece güncel kullanıcı bilgileriyle ilgilenmemesi ve sahip olduğu potansiyelden dolayı veri toplama işini de hafifletmektedir. Bu gibi bir bakış açısından hareketle, nüfus sayımlarından elde edilen veriler potansiyel hizmet talebini daha iyi ortaya koyabilecektir. Bununla beraber PTS muhtemel bazı dezavantajları da ortaya koymaktadır (12). Aslında zaman çizelgesi sonuçları aynı zamanda hizmetten yeterince memnun olmayan ve/veya hizmeti kullanmayan yolcuları da hesaba katmaktadır. Son olarak, bu gibi istenmeyen etkileri azaltmak için bir deneme ve hat analizi yapılmaktadır. Bu son aşama iteratif olmalıdır: ilk olarak bütün yolcuları dikkate alan deneysel bir çizelge belirlenir. Ardından ilk kalkış süreleri elde edilir, ardından kesin olarak bırakan yolcular elenir ve diğer deneysel çizelgeler hesaplanır (13).

Kabuller

Zaman aralıklarına göre $[T_1, T_f]$ zaman çizelgeleriyle ilgilenildiğinden, bu dikkate alınan aralıklardaki yolcu talepleri hesaba katılır. Bu bağlamda aşağıdaki kabuller yapılmaktadır:

· UA'lar her zaman çift yönlü işletilir ve karşılıklı işleyen iki hattan oluşturulur, ayrıca bir hattaki bütün geçiş ve durakların UA'larının aynı istasyon dizilişine sahip olduğu kabul edilir.

· Her bir hat için her bir UA'nın sürüş ve duruş süreleri sabitlenmiştir. Ardından bir hattaki eş değer sürüş çizelgesi, ana terminalden UA kalkış sürelerine göre bütünüyle hesaplanmaktadır.

· Ulaştırma sistemi $[0, T]$ $[T_1, T_f]$ zaman aralığı boyunca işletilmekte olup $[0, T]$ aralığı bütün bir 24 saati kapsayabilir.

· Zaman çizelgesi çözümlemesi dakika düzeyindedir, ayrılan zaman kabulünde önemli bir optimallik kaybı bulunmamaktadır (14).

· $[T_1, T_f]$'deki hizmet için yolcu talebi bilinmektedir ve bütün yolcular hizmetlendirilmelidir.

· Birbirini tamamlayan aralıklarda hizmet için yolcu talebi, bilinse de bilinmese de, herhangi bir durumda detaylı bir zaman çizelgesinin tanımlanmasında dikkate alınmamaktadır.

· Her bir hattın zaman aralığının $[T_1, T_f]$ çizelgesi verilmiş olup bilinmektedir ve bir $T_f$anında bir PTO yolcusu pik dışı zaman aralığı boyunca, sistem kapanmadan önceli herhangi bir zamanda varış noktasına ulaşabilir. Benzer şekilde herhangi bir DTO yolcusu pik dışı zaman aralığında UA çizelgesini kullanarak, herhangi bir durumda, sistem açıldıktan sonra seyahatine başlamak üzere, $t = T_1$'den geç olmamak kaydıyla varış noktasına ulaşabilir.

· Aynı O/D çifti arasındaki bütün yolcular aynı güzergâhı takip eder. Bu gibi güzergâhların her birisi birer sıra ayağına sahip olup her birisi bir kuyruk ya da son durakla sınırlandırılmıştır.

· Bir durak farklı hatlara ya da aynı hatta ait olabilir fakat ters varış noktalarıyla sınırlı UA hizmetleri, fiziksel olarak aynı yerde yer alıyor olsalar bile, ayrı olarak dikkate alınırlar. Diğer bir deyişle her bir durak kendi ait olduğu hattı (ve ondaki yönü) eşsiz biçimde tanımlamaktadır. Hattı değiştirmek için, yolcular mümkün olduğunca kısa sürede bir duraktan diğerine geçmek durumundadırlar (15).

Yukarıda verili hipotezlerle, PTS'nin minimize edilmesi hizmeti bekleyen PTO yolcularınca bütün bir zaman harcamasının minimize edilmesine denk olmakta ve DTO yolcularının varış noktasına zamanında ulaşması için erken hareket gerekmektedir. Bundan dolayı PTS yerine, amaç fonksiyonunda maliyet unsuru olarak bu gibi ölçütler dikkate alınacaktır. Son olarak, ulaştırma ağ yapısında herhangi bir hipotez geliştirilmediği de kaydedilmelidir (16).

Akabinde bu tarz çalışmalarda kullanılan formülasyon ortaya konmuştur. Formülasyonda bir farklılaştırma olarak öge dizileri ve ögelerin göstergelerinin dizileri aynı yolla tanımlanmaktadır (17).

Çözüm Yaklaşımı

Bu kapsamda, problemin çözümü içinönceki adımlarda tanımlanmış olan, langraj temelli bir bulgusalyaklaşım önerilmektedir. Çözüm prosedürü yapıcı olup belirli bir zaman için tekil hat olarak planlanmıştır (18). Bu bağlamda söz konusu adım şu şekilde kurgulanmaktadır: ilk olarak problem matematiksel olarak formüle edilmektedir. Ardından matematiksel problem, langraja göre açılır ve böylelikle tekil bir hat dizisi şeklinde çözümlenebilir (19).

Amaç fonksiyonu; işletim maliyetleri (her bir seyir için sabitlenmiş) toplamını ve hizmet için bekleyen PTO yolcularının harcadığı toplam zaman ile DTO yolcularının varış noktasında zamanında olmasını sağlayacak olan erken hareket için harcanan toplam zamana bağlı olarak ölçülen yolcu bekleme maliyetlerini minimize etmektedir (20). Son olarak; geriye kalan kısıtlar bütün ikili olmayan değişkenlerin negatif olmayan ve sonlu olduğunu göstermektedir. Bu problem; daha önce dikkate alınmış olan problemden üretilmiş olduğundan dolayı karmaşık bir problemdir (21).

Aynı hattaki iki ardışık UA arasındaki minimum sefer aralığındaki ilave kısıtlar da önceki adımlarda kayda alınmış olup aslında ihmal edilebilecek düzeydedirler, fakat bu aşamada, kolaylık olması için ihmal edilmişlerdir. Optimalite kaybı olmaksızın sadece duraklardaki yolcu bekleme süreleri hesaba katılmıştır. Aslında ortaya konan hipotezde, UA platformunda yolcunun harcadığı bütün süre bir sabite ile ifade edilir (22).

Hatların Planlaması

Daha önce belirtildiği üzere önerilen modelin ana çekincesi boyutu, özellikle de değişkenlerinin sayısıdır. Bu adımda bir tekil hat planlaması problemi değerlendirilmekte ve aynı zamanda imkân dâhilindeki bir yaklaşım da dikkate alınan durak sayısını düşürmek için ortaya konulmaktadır (23).

Bu aşamada, öncekilerde olduğu gibi, bütün UA'ların aynı hız dağılımına göre hareket ettikleri ve platformlarda aynı bekleme sürelerine riayet ettikleri kabul edilmektedir (24). Karşılıklı hatlardaki seyirlerin zaman çizelgesi, UA'ların iki terminal durağından birisinde (genellikle daha az önemli olanı) öncelikli sabit zamanlıolarak durduğu kabulüne göre hesaplanabilmektedir. Bu hipotezde iki terminal durağından sadece birisindeki, ana terminaldeki varış süreleri karar değişkenleri olarak dikkate alınabilirve iki karşılıklı hat, örneğin aynı terminal durağında başlayıp biten bir hat ve ikincil terminal durağı kendi bekleme süresince karakterize edilen normal bir durak gibi dikkate alınacak şekilde, tekil bir ring gibi görülebilir (25). Basitleştirmek adına, bu tarz çalışmalarda, hipotez kabulü sürekli olarak dikkate alınmaktadır. Ardından her bir karşılıklı hat çifti tekil bir hat olarak değerlendirilmektedir.

Bir ulaştırma sisteminin zaman çizelgelendirilmesinde önerilen yaklaşım; tekil hatların çizelgelendirilmesinde problemin çözülmesidir. Maalesef ki bu gibi bir yaklaşım gerçek sistemler için pratik olmamaktadır. Bununla beraber çözüm felsefesine dayanarak bir çizelgelendirilme algoritması türetilebilir. Her iki yaklaşım da tekil hattın çizelgelendirilme probleminin en azından sezgisel olarak çözülebilir olduğunu kabul etmektedir (26).

Önerilen algoritma; fiziksel anlamlarına bağlı olarak, langraj çarpanının ve karar değişkenlerinin optimal değerlerinin tekrarlı hesabını yapmaktadır. Ardından belirlenen zamana göre hat planlanır. Planlanmak üzere bir sonra-

ki hattın seçimi, ilgili prosedürün açık bir şekilde kritik bir aşamasını teşkil etmektedir (27). Farklı seçim kriterleri farklı planlamalara yönlendirebilmektedir. Bununla beraber yöneticiler ağ işletimlerinden sorumlu olup genellikle deneyimlerine dayalı olarak hatlarla ilgili bütünlüklü komutlar tanımlayabilirler. Örneğin aşağıdaki ihtimaller dikkate alınabilir: önemlerine göre hatların planlanması ya da birbirini bağlayan istasyonlar boyunca bütün bir komutun tanımlanması, ardından, en önemli istasyonları bağlayan hatlar öncelikle planlanması ve hatların önemine göre bağlantıların çözülmesidir (28).

Avrupa-ABD Karşılaştırması

Avrupa kentleri arasındaki mesafeler sıklıklı Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (ABD) kentler arasındaki mesafeler ile benzer olmasına karşın, Avrupa kentlerindeki nüfus yoğunlukları daha yüksektir. Fransa'daki yoğunluk 100 kişi/km^2'nin biraz altındadır, Almanya'da 235,8 km^2, Belçika'da 343,9 km^2, Birleşik Krallık'ta 253,0 km^2 ve hatta İspanya'da da 81,1 km^2'dir (29). Güney Kore'nin nüfus yoğunluğu ise 493,8 km^2'dir. Yüksek nüfus yoğunlukları, nispeten küçük yerleşimler de dâhil olmak üzere her bir istasyonun mücavir alanı dâhilinde daha fazla yolcu anlamına gelmektedir (30). Ayrıca Avrupa ve Japonya'da kullanımdaki yüksek hızlı tren (YHT) bir tren seyahati kültürü dâhilinde yer almaktadır. Bu ülkelerde tren seyahati ABD'ye nazaran yüksek olup güzergâh yoğunluğu ise ABD'ye nazaran oldukça yüksektir. Verili demiryolu seyahati kültürü dâhilinde, düzenli demiryollarından yüksek hızlı demiryollarına geçiş, değişikliğin boyutu anlamında büyük bir adımı ifade etmemektedir (31).

Belki de en önemlisi çoğu ülke yüksek hızlı demiryollarını (YHD) endüstri, bölgesel ekonomi, çevre, istihdam, ihracat ve kalkınma yönleri dâhilinde milli bir ekonomi projeksiyonunun bir parçası olarak görmekte ve hat inşalarını bu yönü ile teşvik etmektedir (32). Bölgesel ekonomik kalkınma politikalarının bir parçası olarak fonlanmaktadırlar. Hatlar sadece insanları ulaştırmak için değil fakat aynı zamanda da geri kalmış bölgelerdeki ekonomik kalkınmayı canlandırmak için de inşa edilmektedir (33). Bir yüksek hızlı tren bağlantısı bir havaalanı yerine ikame ve yerel hatları ulusal ağa bağlayan bir vasıfta da değerlendirilmektedir.

Yüksek hızlı demiryolları (YHD) aynı zamanda ulusal sanayi politikalarının da bir parçası haline dönüştürülmüştür: Fransa ve Almanya aynı zamanda yüksek hızlı demiryolu (YHD) ağlarını ulusal markalarının tanımının bir yolu olarak görmekte olum Fransa'da Alstom ve Almanya'da Siemens buna birer örnek teşkil etmektedir (34). Yüksek hızlı demiryolları (YHD) çoğu zaman milli bir çevre politikasının bir parçası olarak teşvik edilmektedir. Tren, uçak seyahatlerinin aksine karbon salımlarını ve petrol ithalatına verilen itibarı azaltmaktadır (35).

Herhangi bir yerdeki gelişmiş ağlar işletimcilere ekonomik ölçeklerden

faydalanma imkânını vermektedir. Sanayi ortaklar tren dizilerinin temini noktasında rekabet halindedir. Amerika için önerilen her bir kısa hat kendine has ayrık bir yapıyı ortaya koymaktadır. Her bir güzergâh, tren dizisi ve ekipmanları için ayrı ayrı birer uzlaşmayı gerektirmekte ve her güzergâh kendine has özel tren dizileri gerektirmektedir (36). Ağlarda tren arıza durumları için ilave ve yedek kapasitelerin bulunması gerekmektedir. Daha küçük hatlar için yedek stokunun görece maliyeti daha fazla olabilir. Ayrık güzergâhlar besleme hizmetlerine sahip olmayabilir ve birbirlerine çapraz sübvansiyonlar sağlamayabilirler. Yolcular bir ağda değil de sadece belirli bir hat üzerinde seyahat edebildiklerinden dolayı havayollarından farklı olarak söz konusu hatlar sık bir yolcu faydası ortaya koyamamaktadırlar. Çünkü her bir hat nispeten kısa olup nispeten kısa mesafeli pazarlara hizmet vermektedir. Milli ekonomik faydalara göre uyarlanmaları zor olabilir (37).

Ayrıca yüksek hızlı demiryollarının (YHD) uzun vadede kamu sübvansiyonlarını sürekli alacağının da bir garantisi yoktur. Avrupa demiryolu işletimcileri önemli sübvansiyonlara erişmiş olup hatta Birleşik Krallık'taki hizmetler özelleştirilmiş olarak görülmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) yüksek hızlı demiryolu (YHD) sübvansiyonlarının düzenlenmesi zordur (38). Özel havacılık şirketleri de benzer faydaları talep etmektedir (39).

Yeni hat işletimcileri muhtemelen Amerika Birleşik Devletleri (ABD) demiryolu yük taşımacılığı şirketleri ya da Avrupa demiryolu şirketlerinden temin edilecektir. Yurtiçi şirketler ile ilgili durumda ise demiryolu yük taşımacılığı şirketlerinin diğer kullanımlar için sübvanse edilmek yerine yolcu hizmetleri için sübvanse ediliyor olması değerlendirilmekte ve tartışılmaktadır (40). Yabancı şirketler ile ilgili durumda ise değerlendirmeler yabancı menşeli demiryolu işletimcilerinin Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) hizmet verecek hatlar için Amerika Birleşik Devletleri (ABD) hükümetinin parasını kullanmaları ile ilgili durumdur (41).

Bununla beraber Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) az sayıda yerel ulaştırma sistemi bilet fiyatları ile kendi maliyetlerini karşılayabilmektedir. Yerel ulaştırma sistemleri satışlar ve emlak vergileri yolu ile sübvanse edilmektedir. Yeni hat maliyetlerinin karşılanma kaynakları üzerine muhtemelen daha fazla düşünülmesi gerekecektir (42). Amerika Birleşik Devletleri (ABD) demiryollarına ayrılmış bir fon teşekkülüne sahip değildir ve demiryolları ile ilgili ulusal bir ulaştırma stratejisinden de söz edilemez. Mevcut durumda bunun için herhangi bir yol bulunmamakta olup emlak vergilerindeki artış gibi üretilen olumlu dışsallık faydalarının bir kısmının temini için yeni demiryolu hatlarının inşası ve işletmesi söz konusu stratejiler olmaksızın sağlıklı harekete geçirilemez (43). Bu durum daha yüksek yerel vergi karlarına dönüşmekte fakat bunun da anapara maliyetleri ya da işletim maliyetlerinin karşılanmasında kullanılmamalıdır. Dahası planlama ve ilgili izin ile onay süreçleri de inşa süresinin üzerine bir on yıl daha eklemek anlamına gel-

mektedir. İzin süreci başlamadan önce fon hibesi gerçekleşir ise enflasyon ile nüfus ve istihdamdaki geçişler hat planlamasını mevcut koşullara mahkûm etmiş olur (44).

Avrupa tecrübesi yüksek hızlı trenlerin 640 ile 800 km arası kısa ve orta mesafelerde 300 km/saat'lik hızlarda iyi çalıştığını göstermektedir. Dolayısı ile yüksek hızlı demiryolları (YHD) Los Angeles ve San Fransisko arasından 300 km/saat'lik hızlarda, ileri düzeyde bir varış gerektiren havayolları ile rekabet edebilecek düzeyde bir performans gösterip havayolları yerine ikame olabilir (45). Yüksek hızlı trenler (YHD) ile New York'tan Chicago'ya 5 saatin biraz üzerindeki seyahat süreleri ile varmak mümkün olabilir (46).

Yeni demiryolu hatları diğer ulaştırma türleri ile rekabet edebilir, mevcut karayolu ve demiryolu ağlarının ise hâlihazırda bekleyen bakım onarım işleri bulunmaktadır. Pek çoklarına göre bu, yatırımın birinci prensibi olmalıdır. Aynı zamanda bunun, daha fazla tali geçiş, mevcut demiryolu sisteminin geliştirilmesi ve sinyalizasyonun modernizasyonu yolu ile tren rotaları ve ray kullanımının daha iyi yönetimine imkân tanıması bakımından daha az maliyetli ve daha az karmaşık bir yol olarak ele alınması da söz konusu olabilir (47). 2010 yılı itibari ile Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) Ulusal Demiryolu Yolcu Kurumunun (AMTRAK) yolcu yükleme faktörü %44,1 iken bu havayolları için ise %80,4'tür. Kuzeydoğu koridoru ve benzerlerinde, pahalı olmayan otobüs hizmetleri çoğu zaman trenlerden daha hızlı ve daha sıktır (48).

Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) bütün seyahatlerin %87'si otomobil ile yapılmaktadır. Ev iş yolculuklarının da %91'i otomobiller ile yapılmaktadır. Aynı zamanda orta-uzun mesafeli seyahatlerde de baskın olan tür otomobillerdir. İlgili detaylar Tablo 1'de gösterilmektedir (49).

Mesafe (km)	Otomobil (%)	Uçak (%)
80-160	96,97	0,00
160-400	93,73	2,83
400-800	66,64	30,45
800-1200	32,76	63,53
Bütün Seyahatler	80,67	16,37

Tablo 1. İş Yolculuklarında Mesafeye Göre Otomobil Kullanımları

İstasyonlar maliyetlerin bir kısmını karşılamak üzere kiralık araç filoları için ilave yere gereksinim duymaktadırlar. Eğer havayolları dâhil özel işletimciler tanıtımda, sık yolcu faydalarının paylaşılmasında ve demiryolu hatlarının aktarma merkezi olan havaalanlarının beslenmesinde kullanılmasında aktif bir rol alırlar ise yüksek hızlı demiryolları (YHD) daha iyi bir beklenti kaynağına dönüşebilir (50).

Yüksek hızlı demiryolu (YHD) savunucuları söz konusu ulaştırma tü-

rünü var eden nedenleri yeterince etkili ortaya koyamamaktadırlar. 2006 yılında federal eyalet ve yerel yol vergileri toplam karayolu maliyetlerinin sadece %72'sini karşılamakta idi (51). Geri kalanı genel karlardan ödenmektedir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'sının sadece %2,4'ünü toplu ulaştırmaya ayırır iken bu oran Avrupa için %5,0 ve Çin için ise %9,0'dur. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) yüksek hızlı demiryolu (YHD) argümanları basit ve ahlaki bir tonda olma eğilimindedir: yüksek hızlı demiryolları (YHD) çevre dostudur, enerji tasarrufludur, insanları otomobilden uzaklaştırır ve istihdam oluşturur (52). Bu gibi argümanlar kimilerince tek boyutlu ve kolaylıkla çürütülebilir de görülmektedir. Avrupa'da ve diğer yerlerde yüksek hızlı demiryolu (YHD) milli ekonomi ve politik programın bir parçası durumundadır. Havayolu seyahatinin yerine geçebilir, havaalanların baskısını azaltabilir ve birçok zaman havaalanlarının büyümesine alternatif olarak değerlendirilebilirler (53). Kent merkezlerini daha çekici hale getirebilirler. Bundan 40 yıl önce işyeri alanlarının artışının toplu ulaştırmaya olan talebi keskin bir şekilde arttırdığı tespit edilmiştir. Yüksek hızlı demiryolu (YHD) ulaştırması kent merkezlerini iş merkezleri için daha cazip hale getirmekte, havayollarını da kent merkezleri için daha erişilebilir kılmaktadır (54).

Yüksek hızlı demiryollarının (YHD) yük taşımacılığına zarar vereceğine dair de birçok tartışma yürütülmüştür. Bununla beraber yüksek hızlı demiryolu (YHD) yük taşımacılığına da destek temin edilebilir (55). Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) yükün yarıdan fazlası demiryolları ile taşınmaktadır. Yük taşımacılığı sektöründeki yıllara yayılı gelişimin ardından, yüksek hızlı hatlar karayollarındaki basıncı hafifletebilir, mevcut demiryolu yük ağını tamamlayabilir ve özel demiryolu işletimine destek çekebilir (56).

Sonuçlar

Önerilen prosedür iki tür ağ yapısında sınanmıştır. İlk yapıda hatlar bir ağaç şeklinde organize edilmiş, ikinci yapıda ise ağ şeklinde yapılandırılmıştır (57). Her iki durum için beş karşılıklı hat dikkate alınmıştır. Yolcu talebi; gündüz saatleri yolcuların çoğunluğunun hareket ettiği yöne göre ve öğleden sonraki saatlerde yolcuların çoğunluğunun harekete başladığı yere göre bir ana istasyon teşekkülü hipotezine göre rastgele üretilmiştir (58).

Bu tarz çalışmalar kapsamında, ulaştırma ağlarının çizelgelendirilmesi için genel olarak sezgisel bir prosedür sunulmuştur. Çözüm prosedürü belirlenen bir zaman için tekil hat planlamakta olup her bir adımda bir önceki karara kısmi düzeltme uygulanmaktadır (59).

Önerilen algoritma; transfer koordinasyon probleminin sezgisel çözümüyle, güncel planın tanımlanmasında pratik bir yolla işletmecileri desteklemektedir. Bununla beraber hâkim görüş ise günlük ev-iş yolculukları için ulaştırma ağ planlamasına bağlı olarak ekonomik ve sosyal göstergelerin

bütünüyle yakalanmasını sağlayacak herhangi bir matematiksel modelin olmadığı yönündedir. Bu nedenle; karar alıcının önerilen yaklaşımda uygulanan prosedürle etkileşimi kesinlikle sezgiseldir. Özellikle, işletmecinin hangi hatların planlanacağı konusundaki komutu manuel olarak belirlemesine izin verilmesi, bu yaklaşımı kullanışlı olmaktan çıkaracaktır.

1956'dan 1992'ye kadar yürütülen eyaletler arası otoyol programına paralel olarak yüksek hızlı demiryolları da (YHD) uzun dönemli bir projedir. Otoyollar Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) ekonomik coğrafyayı dönüşüme uğratmıştır. Onlar olmaksızın büyük kentlerdeki gelişimlerin ancak %8'lerde kalacağı hesaplanmıştır. Buna karşın nüfusun da %17 azalacağı tahmin edilmiştir. Demiryolu, sadece yeni hatların inşasını değil fakat aynı zamanda da belirli kutuplanmalar ve merkezileşmeleri teşvik eden bölgesel bir kalkınma odağını da ihtiva etmektedir. İstasyonlar çevresindeki özel değerlendirme bölgeleri, hat açıldıktan sonra yüksek arazi kullanabileceği ve yeniden arazi satışı olabileceğinden dolayı hat maliyetlerini karşılayacak arazi değerleri artışından kaynaklı ilave vergi gelirlerini temin edebilir (60).

1970 ile 2000 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) nüfus 100 milyon artış göstermiştir. Bu nüfus otoyol çevrelerine iskân edilmiştir. 2000-2050 yılları arasında nüfusun bir 100 milyon daha artması beklenmektedir. Bunlar da yüksek hızlı demiryolu (YHD) ağı mücavir alanlarında iskân edilebilir. Hızlı gelişen eyaletlerde yüksek hızlı demiryolu (YHD) hatları kasabalar, kentler ve bölgelerin etrafında gelişebileceği bir toplanma alanı temin edebilirler. Yenilikçi arazi kullanımı politikaları Toronto'dakine benzer bir etkiye yönlendirmektedir (61). Toronto metrosu 1954'te açıldıktan sonra metro istasyonları çevresinde yüksek yoğunluklu bir kalkınma ortaya çıkmıştır. Arazi kullanım kontrolü ve bölgesel koordinasyon yüksek hızlı demiryolu (YHD) istasyonları çevresinde benzer etkiler üretebilir. Bununla beraber bu durum da fonlama ve yönetimde yeni yaklaşımları gerektirebilir.

KAYNAKÇA

1. E. Arkin, D. Joneja, R. Roundy, Computationalcomplexity of uncapacitated-multi-echelonproductionplanningproblems, Operations ResearchLetters 8 (1989) 61–66.
2. J.H. Bookbinder, A. Desilets, Transfer optimization in a transit network, TransportationScience 26 (1992) 107–118.
3. M.R. Bussieck, T. Winter, U.T. Zimmermann, Discreteoptimization in public-rail transport, Mathematical Programming 79 (1997) 415–444.
4. Federgruen, M. Tzur, A simpleforwardalgorithmtosolve general dynamiclotsi-zingmodels, Management Science 37 (1991) 909–925.
5. Federgruen, M. Tzur, Thejointreplenishment problem with time-varyingcost-sanddemand: Efficient, asymptoticandoptimalsolutions, Operations Research 42 (1994) 1067–1086.
6. M.L. Fisher, An applicationorientedguidetoLagrangianrelaxation, Interfaces 15 (2) (1985) 10–21.
7. J.S. Hooghiemstra, L.G. Kroon, M.A. Odijk, M. Salomon, P.J. Zwaneveld, Deci-sionsupportsystemssupportthesearchforwin–winsolutions in railway network design, Interfaces 29 (2) (1999) 15–32.
8. J.-J. Jaw, A.R. Odoni, H.N. Psaraftis, N.H.M. Wilson, A heuristicalgorithm-forthemulti-vehicleadvancerequestdial-a-rideproblem with time windows, TransportationResearch 20B (1986) 243–257.
9. Baum-Snow, 2007. Did highways cause suburbanization? Quarterly Journal of Economics 2007, 775–805.
10. Brennan, John, Edward, Hill, 1999. Where are the Jobs? Brookings Institute Center on Urban and Metropolitan Policy, Washington, DC.
11. Bureau of the Census, 2011. Resident Population Data Population Density. http:// 2010.census.gov/2010census/data/apportionment-dens-text.phpSkip (viewed 20.04.11) (top horizontal navigation section).
12. Bureau of Transportation Statistics, 2001. National Household Travel Survey 2001.
13. Bureau of Transportation Statistics, Research and Innovative Technology Ad-ministration, 2011. Key Transport Indicators.
14. Burnett, Victoria, 2009. Spain's High Speed Rail Offers Guideposts for US, New York Times, May 30, 2009.
15. Department for Transport, 2011. High Speed Rail: Investing in Britain's Future. http://www.dft.gov.uk/pgr/rail/pi/highspeedrail/ (viewed 20.04.11).
16. Department for Transport, Office of Rail Regulation, 2011. Realising the Poten-tial of GB Rail London: Department for Transport. http://www.rail-reg.gov.uk/ upload/ pdf/rail-vfm-detailed-report-may11.pdf (viewed 12.07).

17. Der Spiegel, 2010 German Rail's Growing Image Problem, 7/13/2010. www.spiegel.de/international/germany/0,1518,druck-706240,00.html (viewed 20.04.11).

18. Diaz Olivera, L., Le Nir, M., Plat, D., Raux, Ch., 1996. Les effets de frontière, une barrière à la compréhension des échanges internationaux? L'Espace géographique 3, 1996.

19. The Economist, 2010. Briefing: American Railways, July 24 2010. Economist, 2011a. Deutsche Bahn: Winter of Disconnect, February 10, 2011.

20. The Economist, 2011b. The Transport Bill: Rocky Road, July 16, 2011.

21. Hughes, Murray, 2007. Inter-Regional TGV Line will have an International Impact. Railway Gazette, 5 September, 2007. http://www.railwaygazette.com/news/ single-view/view/inter-regional-tgv-line-will-have-an-international-impact. html (viewed 20.04.11).

22. Jannsen, 2010. World Almanac and Book of Facts 2010. Infobase Publishing, New York.

23. Lambert, Smith, Hampton, 2009. Thames Valley Office Market, issue 1, Reading.

24. Lang, Robert, 2000. Office Sprawl: The Evolving Geography of Business. The Brookings Institution, Center on Urban and Metropolitan Policy, Washington, DC.

25. Le Point, 2010. L'État va garantir le financement de lignes de trains déficitaires.

26. Odell, Mark, Pickard, Jim, 2012. Doubts over value of HS2. Financial Times, January 11, 2012.

27. Pushkarev, Boris, Jeffrey, Zupan, 1977. Public Transportation and Land Use Policy. University of Indiana Press, Bloomington.

28. Railway Gazette, 2008. Long term TGV Plans. Railway Gazette 2 June, 2008. http:// www.railwaygazette.com/news/single-view/view/long-term-tgv-plans. html (viewed 20.04.11). Railway Gazette, 2011. National Plan to Put Cities 90 Minutes Apart.

29. Railway Gazette, 20 April 2011. http://www.railwaygazette.com/nc/news/ single-view/ view/national-plan-to-put-cities-90-min-apart.html (viewed 20.04.11).

30. Shuai, Xiao Bing, 2005. Are center cities engines of growth? Business Economics 40 (4).

31. Spegele, Brian, 2011. China puts brakes on high-speed trains. Wall Street Journal, April 15, 2011.

32. P. Knopper, T. Muller, Optimized transfer opportunities in public transport, TransportationScience 29 (1995) 101–105.

33. H.L. Lee, S. Nahmias, Single-productsingle-locationmodels, in: S.C. Graves, A.H.G. Rinnooy Kan, P.H. Zipkin (Eds.),Handbooks in Operations Resear-

chand Management Science, vol. 4, Logistics of Productionand Inventory, North-Holland,Amsterdam, 1993, pp. 3–55.

34. Goossens, J.W., van Hoesel, S., Kroon, L., 2006. On solving multi-type railway line planning problems. European Journal of Operational Research, 168(2):403-424. [doi:10.1016/j.ejor.2004.04.036]

35. Guan, J.F., Yang, H., Wirasinghe, S.C., 2006. Simultaneous optimization of transit line configuration and passenger line assignment. Transportation Research Part B, 40(10): 885-902. [doi:10.1016/j.trb.2005.12.003]

36. Hamdouch, Y., Lawphongpanich, S., 2008. Schedule-based transit assignment model with travel strategies and capacity constraints. Transportation Research Part B, 42(7-8):663-684. [doi:10.1016/j.trb.2007.11.005]

37. Laporte, G., Mesa, J.A., Perea, F., 2010. A game theoretic framework for the robust railway transit network design problem. Transportation Research Part B, 44(4):447- 459. [doi:10.1016/j.trb.2009.08.004]

38. Mo, W.T., Wang, L., Wang, B.H., Sun, W., Fei, X., Wang, F.J., Xu, J., Qin, Y., 2011. Two-Layer Optimization Based Timetable Rescheduling in Speed Restriction for High Speed Railway. Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Report No. 11-2367, Washington DC, USA.

39. Schŏebel, A., Schwarze, S., 2006. A Game-Theoretic Approach to Line Planning. Available from http://drops. dagstuhl.de/opus/volltexte/2006/688/pdf/06002. Schoebel Anita.Paper.688.pdf [Accessed on Sept. 1, 2011]

40. Shi, F., Deng, L.B., Huo, L., 2007. Bi-level programming model and algorithm of passenger train operation plan. China Railway Science, 28(3):110-116 (in Chinese).

41. Wang, H.Z., 2006. Study on the Train Scheme of Passenger Transport Special Line. MS Thesis, China Academy of Railway Sciences, Beijing, China.

42. Cacchiani V, Caprara A, Toth P. Non-cyclic train timetabling and comparability graphs. Oper Res Lett 2010;38:179–84.

43. Cacchiani V, Toth P. Nominal and robust train timetabling problems. Eur J Oper Res 2012;219(3):727–37.

44. Cacchiani V, Furini F, Kidd MP. Approaches to a real-world train timetabling problem in a railway node. Omega (Westport) 2016;58:97–110.

45. Caimi G, Fuchsberger M, Laumanns M, Schüpbach K. Periodic railway timetabling with event flexibility. Networks 2011;57(1):3–18.

46. Caprara A, Fischetti M, Toth P. Modeling and solving the train timetabling problem. Oper Res 2002;50(5):851–61.

47. Caprara A, Monaci M, Toth P, Guida PL. A lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem. Discrete Appl Math 2006;154(5):738–53.

48. Forsgren M, Aronsson M, Gestrelius S. Maintaining tracks and traffic flow at the sametime. J Rail Transport Plann Manage 2013;3(3):111–23.

49. Gao Y, Kroon L, Yang L, Gao Z. Three-stage optimization method for the problem of scheduling additional trains on a high-speed rail corridor. Omega (Westport) 2018;80:175–91.

50. Goverde RMP, Bešinovic´ N, Binder A, Cacchiani V, Quaglietta E, Roberti R, Toth P. A three-level framework for performance-based railway timetabling. Transp Res Part C 2016;67:62–83.

51. Higgins A. Scheduling of railway track maintenance activities and crews. J Oper Res Soc 1998;49(10):1026–33

52. Borndörfer, R., Grötschel, M., Pfetsch, M.E., 2005. A Path-based Model for Line Planning in Public Transport. Technical Report 05-18. Zuse Institute, Berlin.

53. Borndörfer, R., Grötschel, M., Pfetsch, M.E., 2007. A column-generation approach to line planning in public transport. Transport. Sci. 41 (1), 123–132.

54. Claessens, M.T., van Dijk, N.M., Zwaneveld, P.J., 1998. Cost optimal allocation of passenger lines. Eur. J. Oper. Res. 110, 474–489.

55. Chang, Y.H., Yeh, C.H., Shen, C.C., 2000. A multiobjective model for passenger train services planning: application to Taiwan's high-speed rail line. Transport. Res. Part B 34, 91–106.

56. Caimi, G., Chudak, F., Fuchsberger, M., Laumanns, M., Zenklusen, R., 2011. A new resource-constrained multicommodity flow model for conflict-free train routing and scheduling. Transport. Sci. 45 (2), 212–227.

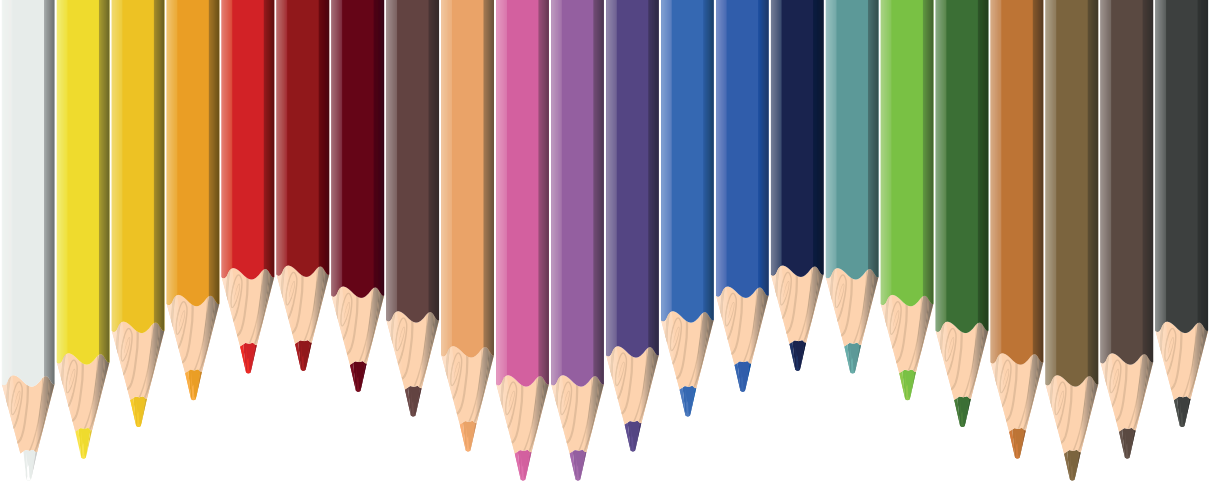
57. De Rus, G. (Ed.), 2009. Economic Analysis of High Speed Rail in Europe. Informes Economia y Sociedad BBVA Foundation. De Urena, J.M. (Ed.), 2012. Territorial Implications of High Speed Rail: A Spanish Perspective. Ashgate Publications Ltd.,

58. Farnham. Fu, X., Zhang, A., Zhang, L., 2012. Will China's airline industry survive the entry of high-speed rail? Res. Transport. Econ. 35, 13–25.

59. Guihaire, V., Hao, J.K., 2008. Transit network design and scheduling: a global review. Transport. Res. Part A 42, 1251–1273.

60. Goerigk, M., Schachtebeck, M., Schöbel, A., 2013. Evaluating line concepts using travel times and robustness. Public Transp. 5, 267–284.

61. Goossens, J., van Hoesel, S., Kroon, L., 2004. A branch-and-cut approach for solving railway line planning problems. Transport. Sci. 38, 379–393



Bölüm 3

BATARYA VE BATARYA SİSTEMLERİNİN GELECEĞİNDE YAPAY ZEKA FAKTÖRÜ

Erhan KAVUNCUOĞLU[1]

1 Dr. Öğretim Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Gemerek Meslek Yüksekokulu, 58840, Sivas Türkiye, ORCID: 0000-0001-6862-2891

1: Giriş

1.1 Giriş ve Motivasyon

Bataryalar, elektrikli cihazların ve araçların güç kaynağı olarak giderek daha önemli hale gelmektedir. Günümüzde, akıllı telefonlardan elektrikli araçlara kadar her türlü cihazda bataryalar kullanılmaktadır.

Batarya performansını ve verimliliğini iyileştirmek için araştırmacılar çeşitli yöntemler geliştirmektedir. Bu yöntemlerden biri de yapay zeka (YZ) teknolojisidir. YZ, bataryaların tasarımını, üretimini, yönetimini ve güvenliğini iyileştirmek için kullanılabilir.

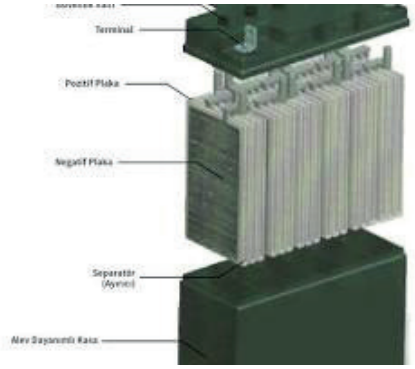
1.2 Batarya ve Batarya Sistemleri

1.2.1 Batarya Nedir?

Batarya, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır. İki veya daha fazla elektrottan ve bunları ayıran bir elektrolit çözeltisinden oluşur. Elektrotlarda, kimyasal reaksiyonlar meydana gelir ve bu reaksiyonlar elektrik enerjisi üretir.

Batarya türleri, kullanılan elektrot ve elektrolit türlerine göre sınıflandırılır. En yaygın batarya türleri şunlardır:

- Kurşun-asit bataryası: Bu tür bataryalar, kurşun ve sülfürik asit elektrotları kullanır. Arabalarda ve diğer elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılırlar (Şekil 1).



Şekil 1. *Kurşun asit batarya [1].*

- Lityum iyon batarya: Bu tür bataryalar, lityum ve bir katyon içeren elektrotları kullanır. Akıllı telefonlarda, dizüstü bilgisayarlarda ve diğer elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılırlar (Şekil 2).



Şekil 2. *Lityum iyon batarya [2].*

- Nikel metal hidrür batarya: Bu tür bataryalar, nikel ve metal hidrür elektrotları kullanır. Elektrikli araçlarda ve diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar (Şekil 3).



Şekil 3. *Nikel metal hidrür batarya [3].*

1.2.2 Batarya Sistemleri ve Uygulama Alanları

Batarya sistemleri, bir veya daha fazla bataryadan oluşan ve elektrik enerjisi depolamak ve sağlamak için kullanılan bir sistemdir. Batarya sistemleri, çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bu uygulamalar arasında şunlar yer alır:

- Akıllı telefonlar ve diğer elektronik cihazlar: Akıllı telefonlar, dizüstü bilgisayarlar ve diğer elektronik cihazlar, güç sağlamak için batarya sistemlerine güvenir (Şekil 4).



Şekil 4. *Akıllı telefonlar ve diğer elektronik cihazlar için batarya sistemleri [4].*

- Elektrikli araçlar: Elektrikli araçlar, elektrik enerjisini depolamak ve hareket etmek için batarya sistemlerine güvenir (Şekil 5).



Şekil 5. *Elektrikli araçlar için batarya sistemleri [5].*

- Güneş panelleri ve rüzgar türbinleri: Güneş panelleri ve rüzgar türbinleri, elektrik enerjisi üretir, ancak bu enerjiyi depolamak için batarya sistemlerine ihtiyaç duyarlar (Şekil 6).



Şekil 6. *Güneş panelleri ve rüzgar türbinleri için batarya sistemleri [6].*

1.2.3 Batarya Performansının Ölçümü ve Değerlendirilmesi

Batarya performansı, aşağıdaki faktörlerle ölçülür ve değerlendirilir:

- Batarya kapasitesi: Bir bataryanın kapasitesi, depolayabileceği enerji miktarını belirler. Bu, amper saat (Ah) cinsinden ölçülür.
- Batarya voltajı: Bir bataryanın voltajı, üretebileceği elektrik enerjisinin gücünü belirler. Bu, volt (V) cinsinden ölçülür.
- Batarya şarj süresi: Bir bataryanın şarj edilmesi için gereken süre.
- Batarya boşalma süresi: Bir bataryanın boşalması için gereken süre.
- Batarya ömrü: Bir bataryanın kullanılabileceği süre.

Batarya performansını iyileştirmek için, araştırmacılar bu faktörleri daha iyi anlamak ve geliştirmek için çalışıyorlar.

1.2.4 Batarya Verimlilik ve Ömrü

Batarya verimliliği, depolanan enerjinin kullanılabilen enerjiye oranıdır. Batarya ömrü, bir bataryanın kullanılabileceği süredir.

Batarya verimliliğini ve ömrünü iyileştirmek için, araştırmacılar yeni batarya malzemeleri ve tasarımları geliştiriyor. Bu çalışmalar, daha verimli ve daha uzun ömürlü bataryaların geliştirilmesine yardımcı oluyor.

1.3 Yapay Zeka ve Batarya Teknolojileri

1.3.1 Yapay Zeka (YZ) Nedir?

YZ, makinelerin insan benzeri akıl yürütme, öğrenme ve problem çözme yeteneklerini taklit etmesini sağlayan bir bilgisayar bilimi dalıdır. YZ, doğal dil işleme, görüntü tanıma, makine öğrenmesi ve robotik gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

1.3.2 Yapay Zeka'nın Batarya Teknolojilerinde Kullanımı

Yapay zeka, batarya teknolojilerinde çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. YZ, bataryaların tasarımını, üretimini, yönetimini ve güvenliğini iyileştirmek için kullanılabilir.

Batarya tasarımında YZ

YZ, batarya tasarımını optimize etmek için kullanılabilir. YZ, batarya performansını etkileyen faktörleri daha iyi anlamak için büyük miktarda veriyi analiz edebilir. Bu, daha verimli ve daha uzun ömürlü bataryaların geliştirilmesine yardımcı olabilir.

Batarya üretiminde YZ

YZ, batarya üretimini otomatikleştirmek için kullanılabilir. YZ, batarya

bileşenlerini bir araya getirme ve test etme gibi görevleri otomatikleştirmek için kullanılabilir. Bu, üretim maliyetlerini ve hata oranlarını azaltmaya yardımcı olabilir.

Batarya yönetiminde YZ

YZ, batarya yönetimini optimize etmek için kullanılabilir. YZ, bataryanın şarj durumunu ve performansını izlemek için kullanılabilir. Bu, bataryanın daha verimli ve daha güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir.

Batarya güvenliğinde YZ

YZ, batarya güvenliğini artırmak için kullanılabilir. YZ, bataryanın termal durumunu ve sağlığını izlemek için kullanılabilir. Bu, batarya arızalarını ve yangınlarını önlemeye yardımcı olabilir.

1.3.3 Yapay Zeka'nın Batarya Verimliliği ve Ömrüne Etkisi

Yapay zeka, batarya verimliliğini ve ömrünü iyileştirme potansiyeline sahiptir. YZ, aşağıdaki yollarla batarya verimliliğini ve ömrünü iyileştirebilir:

- Daha verimli batarya tasarımları geliştirerek: YZ, batarya performansını etkileyen faktörleri daha iyi anlamak için büyük miktarda veriyi analiz edebilir. Bu, daha verimli ve daha uzun ömürlü bataryaların geliştirilmesine yardımcı olabilir.
- Batarya üretimini otomatikleştirerek: YZ, batarya üretimini otomatikleştirmek için kullanılabilir. Bu, üretim maliyetlerini ve hata oranlarını azaltmaya yardımcı olabilir, bu da daha verimli bataryaların geliştirilmesine yol açabilir.
- Batarya yönetimini optimize ederek: YZ, batarya yönetimini optimize etmek için kullanılabilir. Bu, bataryanın daha verimli ve daha güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir, bu da ömrünü uzatmaya yardımcı olabilir.

1.3.4 Yapay Zeka'nın Batarya Sistemleri Tasarımında Rolü

Yapay zeka, batarya sistemleri tasarımında da önemli bir rol oynayabilir. YZ, aşağıdaki yollarla batarya sistemleri tasarımını iyileştirebilir:

- Bataryaları farklı cihazlara ve uygulamalara uyarlayarak: YZ, batarya performansını ve kapasitesini, farklı cihazların ve uygulamaların gereksinimlerini karşılayacak şekilde optimize etmek için kullanılabilir.
- Batarya sistemlerini daha verimli ve daha güvenli hale getirerek: YZ, batarya sistemlerinin termal durumunu ve sağlığını izlemek için kullanılabilir. Bu, batarya arızalarını ve yangınlarını önlemeye yardımcı olabilir.

2. Yapay Zeka Destekli Batarya Yönetimi

Batarya sistemleri, günümüzde birçok farklı uygulamada kritik bir rol

oynamaktadır. Elektrikli araçlar, güneş enerjisi sistemleri, akıllı grid ve diğer birçok alanda batarya sistemleri kullanılmaktadır. Bu uygulamaların etkinliği ve verimliliği, batarya yönetim sisteminin (BMS) performansına bağlıdır.

BMS, batarya sisteminin performansını ve güvenliğini sağlamak için tasarlanmış bir sistemdir. BMS, batarya sisteminin sıcaklığını, voltajını, akımını ve diğer parametrelerini izler ve bu verileri kullanarak bataryayı güvenli ve verimli bir şekilde yönetmek için kararlar alır.

YZ, BMS'lerin performansını ve verimliliğini iyileştirmek için kullanılabilecek bir teknolojidir. YZ, BMS'nin verilerden öğrenmesine ve gelecekteki performansı tahmin etmesine olanak tanır. Bu, BMS'nin bataryayı daha verimli bir şekilde yönetmesine ve aşırı şarj veya deşarj gibi sorunları önlemesine yardımcı olabilir.

2.1 Yapay Zeka'nın Batarya Yönetiminde Kullanım Alanları

Yapay zeka, BMS'lerin performansını ve verimliliğini iyileştirmek için çeşitli şekillerde kullanılabilir. YZ'nin BMS'lerde kullanılabilecek bazı yaygın uygulamaları şunlardır:

- Batarya durum tahmini (SOH): SOH, bataryanın kalan ömrünün bir ölçüsüdür. YZ, SOH'yi daha doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılabilir. Bu, BMS'in bataryayı daha verimli bir şekilde yönetmesine ve ömrünü uzatmasına yardımcı olabilir.

- Batarya şarj optimizasyonu: YZ, bataryayı daha verimli bir şekilde şarj etmek için kullanılabilir. YZ, bataryanın sıcaklığını, voltajını ve diğer parametrelerini dikkate alarak şarj profilini optimize edebilir. Bu, bataryanın ömrünü uzatmaya yardımcı olabilir.

- Batarya arıza tespiti: YZ, batarya arızalarını daha erken tespit etmek için kullanılabilir. YZ, bataryadaki verileri analiz ederek arıza belirtilerini tespit edebilir. Bu, batarya arızalarının onarılmasını daha kolay ve daha az maliyetli hale getirebilir.

2.2 İlgili Çalışmalar

Bu bölümde, mikro şebekelerde batarya kapasitesinin optimize edilmesi ve ada faaliyete odaklanan çalışmalar incelenmiştir. Sintianingrum [7] tarafından yapılan araştırma, yapay zeka türlerinden biri olan partikül swarm optimizasyonunun (PSO) batarya optimizasyonu için kullanılmasını ele almaktadır. Bu çalışma, yapay zeka destekli batarya yönetimi konusuna doğrudan katkıda bulunmaktadır. Moura ve ark. [8] tek partikül modeli ve elektrolit dinamiği ile batarya durumu tahmini üzerine yaptıkları çalışma, gelişmiş batarya yönetim sistemleri için gerçek zamanlı elektrokimyasal durum bilgisinin önemini vurgulamaktadır. Bu çalışma, yapay zeka teknikleriyle geliştirilebilecek doğ-

ru durum tahmininin önemini ortaya koymaktadır. Xing ve ark. [9] elektrikli ve hibrit araçlardaki batarya yönetim sistemleri üzerine yaptıkları araştırma, batarya performansının belirsizliğinin yarattığı zorlukları ele almaktadır. Bu çalışma, yapay zeka destekli yönetim sistemlerinin gerekliliğini anlamak için kritik öneme sahiptir. Fotouhi ve ark. [10] elektrikli araç batarya parametresi tanımlama ve şarj durumu (SOC) gözlemlenebilirlik analizi üzerine yaptıkları araştırma, yapay zeka destekli batarya yönetim sistemlerinin geliştirilmesi için gerekli olan batarya modeli tanımlaması için bir çerçeve sunmaktadır. Wang ve ark. [11] hidrojen acil durum araçları için lityum batarya yönetim sistemlerinin tasarımında, güvenilir çalışma ve şarj özellikleri vurgulanmaktadır. Bu çalışma, yapay zeka destekli batarya yönetimi için hayati öneme sahip hususlara işaret etmektedir. Ma ve ark. [12] kokusuz Kalman parçacık filtresi (UKPF) tabanlı güç bataryalarının ortak durum tahmini üzerine yaptıkları araştırma, bataryaların özellikleri ve kararlılığına ışık tutmaktadır. Bu çalışma, yapay zeka destekli yönetim için kritik öneme sahiptir. Son olarak, Lotfi ve ark. [13] lityum-iyon batarya yönetim sistemleri araştırması için deneysel bir test yatağı geliştirme üzerine yaptıkları çalışma, pratik sistem geliştirme sorunlarını ve teknolojik zorlukları ele almaktadır. Bu çalışma, yapay zeka destekli batarya yönetiminin pratik yönleri hakkında kapsamlı bir anlayış sağlamaktadır.

Bu bölümde yer alan referanslar, batarya yönetim sistemlerinin optimizasyon, durum tahmini, zorluklar ve pratik hususlarını kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Ayrıca, yapay zekanın entegre edilmesiyle performansın artırılmasının önemi vurgulanmaktadır.

3. Yapay Zeka ve Batarya Güvenliği

3.1 Batarya Güvenliği ve Önemi

Batarya güvenliği, bataryaların güvenli bir şekilde çalışması için kritik öneme sahiptir. Batarya güvenliği sorunları, batarya arızalarına, yangınlara ve hatta patlamalara neden olabilir.

Batarya güvenliğini etkileyen faktörler şunlardır:

- Batarya tasarımı: Batarya tasarımı, batarya güvenliğini önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin, batarya bileşenleri ve malzemeleri, aşırı şarj ve aşırı deşarj gibi zarar verici koşullara karşı dayanıklı olmalıdır.

- Batarya üretimi: Batarya üretimi, batarya güvenliğini de etkileyebilir. Örneğin, batarya bileşenlerinin ve malzemelerin doğru şekilde birleştirilmesi ve test edilmesi önemlidir.

- Batarya kullanımı: Batarya kullanımı, batarya güvenliğini de etkileyebilir. Örneğin, bataryalar aşırı şarj edilmemeli, aşırı deşarj edilmemeli ve uygun sıcaklıklarda tutulmalıdır.

3.2 Yapay Zekanın Batarya Güvenliği Üzerindeki Rolü

Yapay zeka, batarya güvenliğini iyileştirmek için kullanılabilir. YZ, aşağıdaki yollarla batarya güvenliğini iyileştirebilir:

- Batarya davranışını daha iyi anlayarak: YZ, büyük miktarda veriyi analiz ederek batarya davranışını daha iyi anlamak için kullanılabilir. Bu, batarya arızalarını ve yangınlarını önlemeye yardımcı olabilir.
- Batarya durumunu ve davranışını gerçek zamanlı olarak izleyerek: YZ, sensörlerden gelen verileri analiz ederek batarya durumunu ve davranışını gerçek zamanlı olarak izleyebilir. Bu, batarya arızalarını ve yangınlarını erken tespit etmeye yardımcı olabilir.
- Batarya arızalarını ve yangınlarını önlemek için algoritmalar geliştirerek: YZ, batarya arızalarını ve yangınlarını önlemek için algoritmalar geliştirebilir. Bu, aşırı şarj, aşırı deşarj ve diğer zarar verici koşullardan kaçınarak yapılabilir.

3.3 İlgili Çalışmalar

Pil güvenliği ve bakımı, pil sistemlerinin verimliliği ve uzun ömürlülüğü için kritik öneme sahiptir. Bu alandaki çalışmalar, pillerin bozulma modellerini izlemek, pil sağlığını değerlendirmek ve pil sistemlerini siber saldırılardan korumak için yeni yöntemler geliştirmeye odaklanmaktadır.

Zhang ve ark. [14] tarafından yapılan çalışma, makine öğreniminin lityum iyon pillerin bozulma modellerini izlemede etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Çalışmada, şarj ve deşarj döngüleri sırasında pillerin empedans spektroskopisi kullanılarak elde edilen verileri analiz etmek için makine öğrenimi algoritmaları kullanılmıştır. Bu yaklaşım, pillerin bozulma modellerini hassas bir şekilde tahmin etmek için kullanılabilir. Vidal ve ark. [15] tarafından yapılan çalışma, pil sağlığı değerlendirmesinin pil sistemlerinin güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamak için kritik öneme sahip olduğunu vurgulamıştır. Çalışmada, makine öğreniminin pil şarj durumu ve sağlık durumunu tahmin etmek için kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu yaklaşım, pillerin güvenli bir şekilde kullanılması ve değiştirilmesi için gerekli bilgiler sağlayabilir. Ravi ve ark. [16] tarafından yapılan çalışma, pil yönetim sistemlerindeki güvenlik hususlarını ele almaktadır. Çalışmada, güvenli gömülü sistem tasarımının pil sistemlerinin güvenliğini sağlamada önemli bir rol oynadığı vurgulanmıştır. Immler ve ark. [17] tarafından yapılan çalışma, pil muhafazalarının fiziksel güvenlik yönlerini ele almaktadır. Çalışmada, tamper-dayanıklı kapakların pil sistemlerinin güvenliğini sağlamada etkili bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Hong ve ark. [18] tarafından yapılan çalışma, lityum-iyon piller üzerinde sağlık değerlendirme araştırmaları yapmanın ve pil sağlığı yönetim teknolojisi geliştirmenin, pil sistemlerinin güvenliğini sağlamak için

son derece önemli olduğunu vurgulamaktadır. Culler ve Burroughs [19] tarafından yürütülen araştırma, kontrol arayüzü güvenliği ve protokol güvenliği konularına odaklanarak, şebeke bağlantılı pillerle ilgili siber güvenlik zorlukları hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Lopez ve ark. [20] tarafından yapılan çalışma, Nesnelerin İnterneti bağlamında pil sistemleriyle ilgili güvenlik zorluklarını ele alarak, birbirine bağlı ortamlarda pil sistemlerinin güvenliğini sağlamak için değerli hususlar sunmaktadır.

Bu çalışmalar, yapay zekanın pil sistemlerinin güvenliğini sağlamada önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Makine öğrenimi, pillerin bozulma modellerini izlemek, pil sağlığını değerlendirmek ve pil sistemlerini siber saldırılardan korumak için kullanılabilir. Bu teknolojilerin geliştirilmesi, pil sistemlerinin güvenliğini ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırabilir.

4. Yapay Zeka ile Batarya Tasarımı ve Üretimi

4.1 Batarya Tasarım Süreci ve Zorlukları

Batarya tasarım süreci, aşağıdaki aşamaları içerir:

- Gereksinimlerin belirlenmesi: Batarya, hangi uygulama için kullanılacağı ve hangi gereksinimleri karşılayacağı belirlenir.
- Bileşen seçimi: Batarya bileşenleri, gerekli performansı ve güvenliği sağlayacak şekilde seçilir.
- Tasarım: Batarya bileşenleri, bir araya getirilerek batarya tasarımı oluşturulur.
- Test: Batarya, performansı ve güvenliği açısından test edilir.

Batarya tasarım süreci, aşağıdaki zorlukları içerir:

- Batarya performansını etkileyen birçok faktör vardır: Batarya kapasitesi, güç yoğunluğu, şarj hızı, deşarj hızı, ömrü ve güvenliği, batarya tasarımını etkileyen faktörlerden bazılarıdır. Bu faktörleri optimize etmek zor olabilir.
- Batarya davranışı karmaşıktır: Batarya davranışı, kimyasal reaksiyonlar, fiziksel süreçler ve termal etkileşimlerin karmaşık bir kombinasyonundan kaynaklanır. Bu davranışı tam olarak anlamak zor olabilir.

4.2 Yapay Zeka Destekli Batarya Tasarımı ve Optimizasyonu

Yapay zeka, batarya tasarımını ve optimizasyonunu iyileştirmek için kullanılabilir. YZ, aşağıdaki yollarla batarya tasarımını ve optimizasyonunu iyileştirebilir:

- Batarya davranışını daha iyi anlayarak: YZ, büyük miktarda veriyi analiz ederek batarya davranışını daha iyi anlamak için kullanılabilir. Bu, daha verimli ve daha güvenli batarya tasarımları geliştirmeye yardımcı olabilir.

- Batarya tasarımını otomatikleştirerek: YZ, batarya tasarımını otomatikleştirmek için kullanılabilir. Bu, insan hatasını azaltmaya ve tasarım sürecini hızlandırmaya yardımcı olabilir.

- Yeni batarya malzemeleri ve tasarımları geliştirerek: YZ, yeni batarya malzemeleri ve tasarımları geliştirmek için kullanılabilir. Bu, batarya verimliliğini ve ömrünü iyileştirmeye yardımcı olabilir.

4.3 Yapay Zeka ile Batarya Üretim Süreci

Batarya üretim süreci, aşağıdaki aşamaları içerir:

- Malzemelerin hazırlanması: Batarya bileşenleri, üretim için hazırlanır.

- Bileşenlerin birleştirilmesi: Batarya bileşenleri, bir araya getirilerek batarya oluşturulur.

- Test: Batarya, performansı ve güvenliği açısından test edilir.

Batarya üretim süreci, aşağıdaki zorlukları içerir:

- Batarya üretimi karmaşık ve hassas bir süreçtir: Batarya bileşenlerinin doğru şekilde birleştirilmesi ve test edilmesi önemlidir. Bu, hata oranlarını azaltmak için zor olabilir.

- Batarya üretimi yüksek maliyetli olabilir: Batarya üretimi, karmaşık ve hassas bir süreç olduğu için yüksek maliyetli olabilir.

4.4 Yapay Zeka'nın Batarya Maliyetine Etkisi

YZ, aşağıdaki yolları kullanarak batarya maliyetini düşürmek için kullanılabilir.

- Batarya üretimini otomatikleştirerek: YZ, batarya üretimini otomatikleştirmek için kullanılabilir. Bu, insan hatasını azaltmaya ve üretim maliyetlerini düşürmeye yardımcı olabilir.

- Yeni batarya malzemeleri ve tasarımları geliştirerek: YZ, yeni batarya malzemeleri ve tasarımları geliştirmek için kullanılabilir. Bu, batarya üretimini daha verimli hale getirmeye ve maliyetleri düşürmeye yardımcı olabilir.

4.5 İlgili Çalışmalar

Bu bölüm, pil üretimiyle ilgili çevresel etki, üretim optimizasyonu, veri odaklı yaklaşımlar ve değişen pil tasarım ve üretim alanını kapsayan konuları ele almaktadır. Ayrıca, yapay zekanın pil üretim verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırma potansiyelini vurgulamaktadır.

Majeau-Bettez ve ark. [21] tarafından yapılan lityum iyon ve nikel metal hidrür pillerin yaşam döngüsü çevresel değerlendirmesi, pil tasarımının

ve üretiminin daha geniş etkilerini anlamak için pil üretiminin çevresel etkisi hakkında bilgiler sunmaktadır. Weber ve ark. [22] tarafından yapılan vanadyum redoks akış pilinin yaşam döngüsü değerlendirmesi, alternatif pil teknolojilerinin çevresel yönlerine ışık tutan temsili bir akış pilinin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Cunha ve ark. [23] tarafından yapılan NMC katot üretim parametrelerinin bağımlılıklarına ilişkin yapay zeka araştırması, yapay zekanın üretim süreçlerini optimize etmede uygulamasını gösteren bir vaka çalışması sunmaktadır. Bu çalışma, yapay zekanın pil üretimine entegrasyonu ile doğrudan ilgilidir. Degen ve Krätzig [24] tarafından yapılan lityum iyon pil hücrelerinin büyük ölçekli üretimi modelleme çalışması, yeni teknolojilerin üretim ekonomisi üzerindeki etkisine dair değerli bilgiler sunmakta ve değişen pil üretim süreçleri manzarasına bir bakış açısı sunmaktadır. Clark ve ark. [25] tarafından yapılan birleşik pil veri tanımı çalışması, pil tasarımı ve üretiminde standartlaştırılmış yaklaşımların gerekliliğini vurgulayan ortak pil veri ve sözlük standartlarının eksikliğini ele almaktadır. Bu yaklaşımlar, yapay zeka destekli veri yönetim sistemleri ile geliştirilebilir. Tidblad ve ark. [26] tarafından yapılan elektrikli araç batarya hücreleri için gelecekteki malzeme gelişmeleri üzerine araştırma, son kullanıcı perspektifinden değişen talepleri ele alarak pil tasarımı ve üretim gereksinimlerinin değişen manzarasına değerli bilgiler sunmaktadır. Turetskyy ve ark. [27] tarafından yapılan lityum iyon pil hücresi üretiminde veri odaklı uygulamalar üzerine çalışma, otomatik ve manuel veri toplamanın birleşimini tanımlamaktadır ve modern pil üretim süreçlerinde veri odaklı yaklaşımların rolünü vurgulamaktadır. He ve ark. [28] tarafından yapılan akış pili üretimi ve çevresel etkisi analizi, sürdürülebilir pil tasarımı ve üretimi için kapsamlı bir anlayışın gerekli olduğu pil üretimindeki çevresel hususlara daha geniş bir bakış açısı sunmaktadır. Zhu ve ark. [29] tarafından yapılan modern lojistik sistemlerinde yapay zeka teknolojisinin entegrasyonu, karmaşık üretim ve tedarik zinciri süreçlerinde yapay zeka uygulamasına ilişkin bilgiler sunmaktadır. Bu çalışma, yapay zekanın pil üretimi lojistiğindeki rolüne daha geniş bir bakış açısı sunabilir.

Bu çalışmalar, pil tasarımının ve üretiminin çevresel etkisini, yapay zeka entegrasyonunu, veri odaklı yaklaşımları ve gelişen pil teknolojilerini kapsayan kapsamlı bir bakış açısı sunabilir.

5. Yapay Zeka ve Batarya Geleceği

YZ, daha güvenli, daha verimli ve daha uzun ömürlü bataryalar geliştirmeye yardımcı olarak, batarya teknolojilerinde önemli bir devrim yaratma potansiyeline sahiptir.

5.1 Yapay Zeka'nın Batarya Geleceğine Etkisi

Yapay zeka, batarya teknolojilerinin geleceğini aşağıdaki şekillerde etkileyebilir:

- Batarya verimliliği ve ömrünün artması: YZ, batarya verimliliğini ve ömrünü iyileştirmeye yardımcı olarak, bataryaların daha uzun süre kullanılmasını sağlayabilir. Bu, elektrikli araçların menzillerini artırmaya ve diğer cihazların pil ömrünü uzatmaya yardımcı olabilir.

- Batarya maliyetlerinin düşmesi: YZ, batarya üretimini otomatikleştirerek ve yeni batarya malzemeleri ve tasarımları geliştirerek, batarya maliyetlerini düşürmeye yardımcı olabilir. Bu, elektrikli araçların daha uygun fiyatlı hale gelmesine ve diğer cihazların daha erişilebilir olmasına yardımcı olabilir.

- Batarya güvenliğinin artması: YZ, batarya arızalarını ve yangınlarını önlemeye yardımcı olarak, batarya güvenliğini artırmaya yardımcı olabilir. Bu, daha güvenli ve daha güvenilir bataryaların geliştirilmesine yardımcı olabilir.

5.2 İlgili Çalışmalar

Bu bölüm, yapay zekanın pil teknolojisinin gelecekteki uygulamalarında oynayacağı potansiyel rolü ele almaktadır. Bölüm, verilerin standartlaştırılması, etik açıdan değerlendirme, küresel bakış açısı ve pil yönetim sistemlerindeki potansiyel gelişmeler gibi konuları ele almaktadır.

Zhou ve ark. [30] tarafından yapılan araştırma, yapay zeka teknolojisi ile birlikte iletişim ağlarının akıllı ağlara doğru potansiyel evrimini incelemektedir. Bu çalışma, yapay zekanın pil sistemleri için iletişim altyapısını şekillendirme konusundaki gelecekteki etkilerini anlamak için kullanılabilir. Bostrom ve Yudkowsky [31] tarafından tartışılan yapay zekanın etik açıdan değerlendirilmesi, yapay zekanın pil teknolojisindeki etik etkilerini araştırmak için entegre edilebilir. Bu, yapay zeka destekli sistemlerin insanlara ve diğer ahlaki açıdan önemli varlıklara zarar vermemesini sağlama ihtiyacının altını çizmektedir. Lu ve Jin [32] tarafından analiz edilen Çin'deki yapay zeka şirketlerinin gelecek vaat eden durumu, yapay zeka geliştirmenin küresel manzarasına ve bunun pil teknolojisinin geleceği üzerindeki potansiyel etkisine dair bilgiler sağlayabilir. Meena ve Reddy [33] tarafından yapılan çalışmada yapay zekanın pil yönetim sistemlerindeki potansiyel uygulamaları vurgulanmakta ve pil yönetimi ve optimizasyonu alanındaki gelecekteki gelişmelere dair kapsamlı bir anlayış sunulmaktadır. Lipchanskaya [34] tarafından tartışılan yapay zeka sistemlerinin gelecekteki gelişimi ve sorumlulukları, pil teknolojisi bağlamında gizlilik, sosyal adalet ve yasal hususları garanti altına almaya yönelik yapay zekanın gelişen rolünü anlamak için kullanılabilir.

Bu çalışmalar, yapay zekanın pil teknolojisindeki gelecekteki etkilerini, etik açıdan değerlendirme, veri standartlaştırma, küresel perspektifler ve pil yönetim sistemlerindeki potansiyel gelişmeler dahil olmak üzere kapsamlı bir şekilde ele alarak bu alanda yapılacak çalışmalar için önemli bir kaynak oluşturabilir.

6. Sonuç ve Öneriler

Sonuç olarak, yapay zeka, batarya teknolojilerinde önemli bir rol oynama potansiyeline sahiptir. YZ, batarya verimliliğini ve ömrünü iyileştirmeye yardımcı olacak çeşitli avantajlar sunar. Yapay zeka tabanlı batarya teknolojilerindeki gelişmeler, gelecekte daha güvenli, daha verimli ve daha uzun ömürlü bataryaların geliştirilmesine yardımcı olabilir.

Yapay zeka tabanlı batarya teknolojilerinin geliştirilmesini ve ticarileştirilmesini hızlandırmak için aşağıdaki öneriler yapılabilir:

- Yapay zeka araştırmalarına yatırım yapmak: Yapay zeka araştırmalarına yatırım yapmak, batarya teknolojilerinde daha fazla gelişmeye yol açabilir.
- Yapay zeka tabanlı batarya teknolojileri için ticarileşme teşvikleri sağlamak: Yapay zeka tabanlı batarya teknolojileri için ticarileşme teşvikleri sağlamak, bu teknolojilerin endüstriyel ölçekte benimsenmelerine yol açabilir.

KAYNAKLAR

[1] A. Yazılım, 'Kurşun Asit Akü Nasıl Çalışır? - Birikimpilleri.net', Birikim Pilleri Batarya Sanayi Tic.Ltd.Şti. Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: https://birikimpilleri.net/blog/kursun-asit-aku-nasil-calisir

[2] E. Özdal, 'Lityum İyon Bataryalar', Malzeme Bilimi ve Mühendislik Sitesi. Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: https://malzemebilimi.net/lityum-i-yon-bataryalar.html

[3] 'Nikel-metal hidrür pil', *Vikipedi*. Jul. 19, 2023. Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: https://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=Nikel-metal_hidr%C3%BCr_pil&oldid=29979855

[4] 'Mobile / Cell Phone Battery', Custom Lithium Ion Battery Pack Supplier - LithiumBatteryChina. Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: https://www.lithiumbatterychina.com/mobile-cell-phone-battery/

[5] E. Şarj, 'Batarya Sistemlerinin Çeşitleri ve Özellikleri Nelerdir?', Ekonomik Şarj. Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: https://www.ekonomiksarj.com/elektrikli-araclarda-kullanilan-batarya-sistemleri-ve-ozellikleri/

[6] Editör, 'Güneş ve enerji depolamadaki yenilikler Solar+Storage NX'te', GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİ. Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: https://www.gesdergisi.com/gunes-ve-enerji-depolamadaki-yenilikler-solarstorage-nxte/

[7] A. Sintianingrum, K. Khairudin, and L. Hakim, 'Optimization of Microgrid Battery Capacity using PSO with Considering Islanding Operation', *J. Eng. Sci. Res.*, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2020, doi: 10.23960/jesr.v2i1.34.

[8] S. J. Moura, F. B. Argomedo, R. Klein, A. Mirtabatabaei, and M. Krstic, 'Battery State Estimation for a Single Particle Model With Electrolyte Dynamics', *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 25, no. 2, pp. 453–468, Mar. 2017, doi: 10.1109/TCST.2016.2571663.

[9] Y. Xing, E. W. M. Ma, K. L. Tsui, and M. Pecht, 'Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles', *Energies*, vol. 4, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2011, doi: 10.3390/en4111840.

[10] A. Fotouhi, D. J. Auger, K. Propp, and S. Longo, 'Electric vehicle battery parameter identification and SOC observability analysis: NiMH and Li-S case studies', *IET Power Electron.*, vol. 10, no. 11, pp. 1289–1297, 2017, doi: 10.1049/iet-pel.2016.0777.

[11] Q. Wang, Z. Liu, S. Liu, R. Cai, and M. Liu, 'Design of Lithium Battery Management System of Hydrogen Emergency Vehicle', *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2479, no. 1, p. 012031, Apr. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2479/1/012031.

[12] K. Ma, L. Xu, Q. Yang, and W. Xu, 'Joint state estimation of power battery based on UKPF', *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2343, no. 1, p. 012019, Sep. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2343/1/012019.

[13] N. Lotfi, P. Fajri, S. Novosad, J. Savage, R. G. Landers, and M. Ferdowsi, 'Development of an Experimental Testbed for Research in Lithium-Ion Battery Management Systems', *Energies*, vol. 6, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2013, doi: 10.3390/en6105231.

[14] Y. Zhang, Q. Tang, Y. Zhang, J. Wang, U. Stimming, and A. A. Lee, 'Identifying degradation patterns of lithium ion batteries from impedance spectroscopy using machine learning', *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, Art. no. 1, Apr. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-15235-7.

[15] 'Machine Learning Applied to Electrified Vehicle Battery State of Charge and State of Health Estimation: State-of-the-Art | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore'. Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9036949

[16] S. Ravi, A. Raghunathan, P. Kocher, and S. Hattangady, 'Security in embedded systems: Design challenges', *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 461–491, Aug. 2004, doi: 10.1145/1015047.1015049.

[17] V. Immler *et al.*, 'Secure Physical Enclosures from Covers with Tamper-Resistance', *IACR Trans. Cryptogr. Hardw. Embed. Syst.*, pp. 51–96, 2019, doi: 10.13154/tches.v2019.i1.51-96.

[18] S. Hong, T. Yue, and H. Liu, 'Vehicle energy system active defense: A health assessment of lithium-ion batteries', *Int. J. Intell. Syst.*, vol. 37, no. 12, pp. 10081–10099, 2022, doi: 10.1002/int.22309.

[19] M. Culler and H. Burroughs, 'Cybersecurity Considerations for Grid-Connected Batteries with Hardware Demonstrations', *Energies*, vol. 14, no. 11, Art. no. 11, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14113067.

[20] A. B. Lopez, K. Vatanparvar, A. P. Deb Nath, S. Yang, S. Bhunia, and M. A. Al Faruque, 'A Security Perspective on Battery Systems of the Internet of Things', *J. Hardw. Syst. Secur.*, vol. 1, no. 2, pp. 188–199, Jun. 2017, doi: 10.1007/s41635-017-0007-0.

[21] G. Majeau-Bettez, T. R. Hawkins, and A. H. Strømman, 'Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles', *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 10, pp. 4548–4554, May 2011, doi: 10.1021/es103607c.

[22] S. Weber, J. F. Peters, M. Baumann, and M. Weil, 'Life Cycle Assessment of a Vanadium Redox Flow Battery', *Environ. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 18, pp. 10864–10873, Sep. 2018, doi: 10.1021/acs.est.8b02073.

[23] R. P. Cunha, T. Lombardo, E. N. Primo, and A. A. Franco, 'Artificial Intelligence Investigation of NMC Cathode Manufacturing Parameters Interdependencies', *Batter. Supercaps*, vol. 3, no. 1, pp. 60–67, 2020, doi: 10.1002/batt.201900135.

[24] F. Degen and O. Krätzig, 'Modeling Large-Scale Manufacturing of Lithium-Ion Battery Cells: Impact of New Technologies on Production Economics', *IEEE Trans. Eng. Manag.*, pp. 1–17, 2023, doi: 10.1109/TEM.2023.3264294.

[25] S. Clark *et al.*, 'Toward a Unified Description of Battery Data', *Adv. Energy Mater.*, vol. 12, no. 17, p. 2102702, 2022, doi: 10.1002/aenm.202102702.

[26] A. A. Tidblad *et al.*, 'Future Material Developments for Electric Vehicle Battery Cells Answering Growing Demands from an End-User Perspective', *Energies*, vol. 14, no. 14, Art. no. 14, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14144223.

[27] A. Turetskyy, S. Thiede, M. Thomitzek, N. von Drachenfels, T. Pape, and C. Herrmann, 'Toward Data-Driven Applications in Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing', *Energy Technol.*, vol. 8, no. 2, p. 1900136, 2020, doi: 10.1002/ente.201900136.

[28] H. He, S. Tian, B. Tarroja, O. A. Ogunseitan, S. Samuelsen, and J. M. Schoenung, 'Flow battery production: Materials selection and environmental impact', *J. Clean. Prod.*, vol. 269, p. 121740, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121740.

[29] X. Zhu, N. Liu, and Y. Shi, 'Artificial intelligence technology in modern logistics system', *Int. J. Technol. Policy Manag.*, vol. 22, no. 1/2, p. 66, 2022, doi: 10.1504/IJTPM.2022.122537.

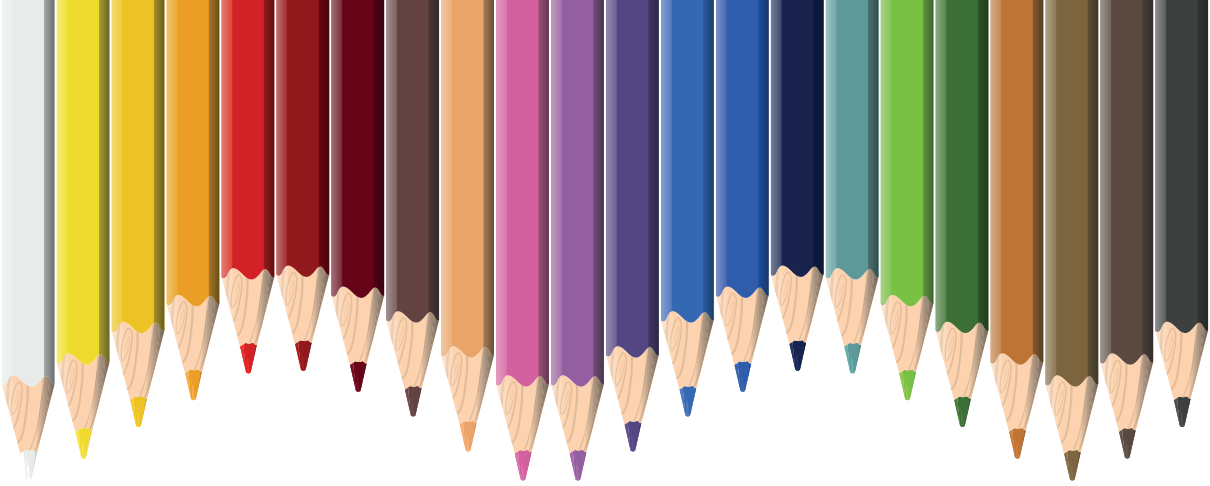
[30] Z. Wu *et al.*, 'Research on intelligent scheduling algorithm of high altitude platform system for wide area internet of things', *Wirel. Netw.*, Nov. 2021, doi: 10.1007/s11276-021-02842-5.

[31] N. Bostrom and E. Yudkowsky, 'The ethics of artificial intelligence', in *The Cambridge Handbook of Artificial Intelligence*, K. Frankish and W. M. Ramsey, Eds., Cambridge: Cambridge University Press, 2014, pp. 316–334. doi: 10.1017/CBO9781139046855.020.

[32] K. Lu and C. Jin, 'Analysis of the Development Prospect of AI Companies in China', presented at the 2021 3rd International Conference on Economic Management and Cultural Industry (ICEMCI 2021), Atlantis Press, Dec. 2021, pp. 1639–1648. doi: 10.2991/assehr.k.211209.265.

[33] M. Meena, R. Reddy, M. Meena, and R. Reddy, 'Smart energy storage systems review on determining efficient battery management systems', *Int. J. Sci. Res. Arch.*, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, 2023, doi: 10.30574/ijsra.2023.8.2.0334.

[34] M. A. Lipchanskaya, M. A. Eremina, and S. A. Privalov, 'Artificial Intelligence Responsibilities: Ethical And Legal Issues', *Eur. Proc. Soc. Behav. Sci.*, vol. Freedom and Responsibility in Pivotal Times, Mar. 2022, doi: 10.15405/epsbs.2022.03.1.



Bölüm 4

KÜMELEME ANALİZİ YÖNTEMLERİNİN GENEL DEĞERLENDİRMESİ

Mesut SAMASTI[1]

1 https://orcid.org/0000-0002-4900-8279
TUBITAK TUSSIDE, Kocaeli Turkey
E-mails: mesut.samasti@tubitak.gov.tr, mesutsamasti@gmail.com

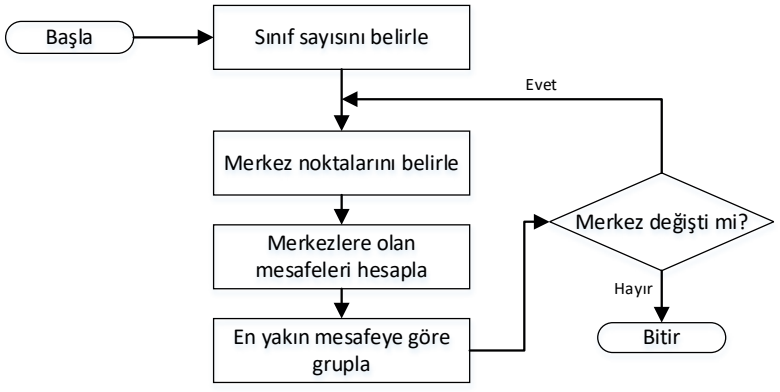
Giriş

Kümeleme analizi, doğal grupları bilinmeyen bir veri matrisinde, benzerlik gösteren değişkenler içerisinde anlamlı gruplar oluşturacak şekilde alt kümeye ayırmaya yardımcı olan yöntemleridir (Ye, 2003). Bu çalışma ile yaygın olarak kullanılan 9 farklı kümeleme analizinin genel değerlendirmesi yapılacaktır. Bu yöntemler K-Ortalamalar Kümeleme Tekniği, Bulanık C Ortalama, K-medoids, Gustasson Kessel Yöntemi, Beklenti Maksimizasyonu (EM-Expectation Maximization), Hiyararşik Kümeleme, Genetik Algoritma, Gürültülü Uygulamaların Yoğunluk Tabanlı Mekânsal Kümelenmesi ve Ortalama Kaydırma Kümeleme Analizi yöntemleridir. Çalışma kapsamında bu yöntemlere ait genel tanımlar yapılıp, ilgili yöntemlere ait işlem adımlarının akış diyagramları ile avantaj ve dezavantajlarına değinilecektir.

K-Ortalamalar Kümeleme Tekniği (K-Means)

1967 yılında Mac Queen tarafından geliştirilmiştir. Yoğun olarak kullanılan kümeleme algoritmalarından biridir. Algoritmanın çalışma mantığında k sayıda kümeye ait elemanların ağırlık ortalamalarını hesaplayarak bir sonuç elde etmektedir. Kümeye ait ağırlık merkezine mesafe olarak en yakın olan küme elemanı küme merkezi olarak seçilir (Berkhin, 2007).

K-means işlem basamakları dört adımdan oluşmaktadır. İlk adımda küme merkezleri belirlenir. Bu adım 2 farklı şekilde yapılabilmektedir. Birinci seçenekte rastgele n adet nokta seçilir. Diğer seçenekte ise verilerin ortalamaları alınarak merkez belirlenir. İkinci adımda elemanların merkeze olan uzaklıkları hesaplanarak kümelere atamaları yapılır. Üçüncü adımda yeni atanan elemanı da dikkate alarak küme merkezi tekrar hesaplanır. Dördüncü adımda ise tüm elemanlar atanana kadar işlemler devam eder. K ortalamalara ait genel işlem adımları Şekil 1 ile verilmiştir (Çalışkan, 2008).



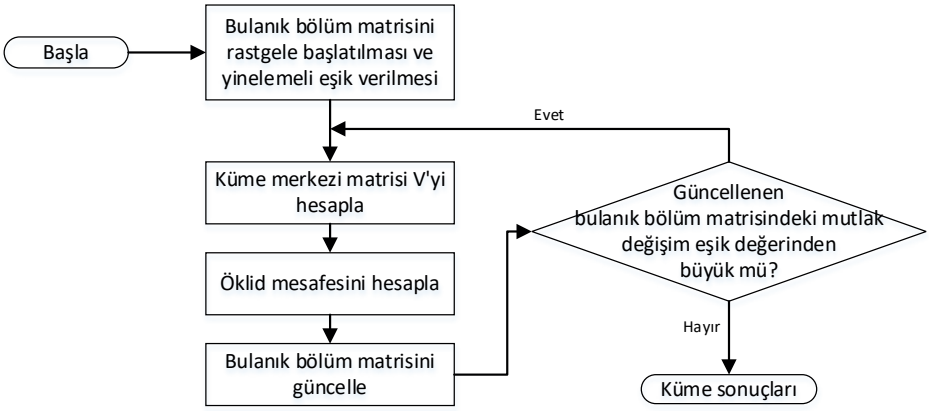
Şekil 1. K-Ortalamalar işlem basamaklar

K – Ortalamalar tekniğinin dört özelliği vardır. Bunlar, N adet kümeye sahip olması, kümeler içerisinde nesnesiz küme olmaması, kümelerin hiya-

rarşik olması, küme içerisindeki nesnelerin en yakın olduğu küme merkezi içerisinde bulundukları kümenin merkezi olmasıdır. Bu tekniğin eksikliği ise kaç adet kümeye ihtiyaç olduğunu hesaplayamamasıdır. İdeal küme sayısı deneme yanılma ile belirlenebilmektedir (Ergin, 2016).

Bulanık C Ortalamalar Kümeleme Tekniği (FC-Means)

Bulanık C Ortalamalar (BCO) tekniği ilk olarak 1974 yılında Dunn tarafından önerilmiş (Dunn, 1974) ve 1981 yılında Bezdek tarafından geliştirilmiştir (Bezdek vd., 1984). Bulanık küme yöntemi, nesnelerin kümlere 0-1 değerleri arasında hangi derecede ait olduğunu belirleyebilen üyelik fonksiyonu ile hesap yapmakta ve üyelik derecesi en yüksek olan kümeye atamasını yapan bir yöntemdir (De Oliveira ve Pedrycz, 2007). Bulanık C ortalamalara ait genel işlem adımları Şekil 2 ile verilmiştir (Wang vd., 2015).



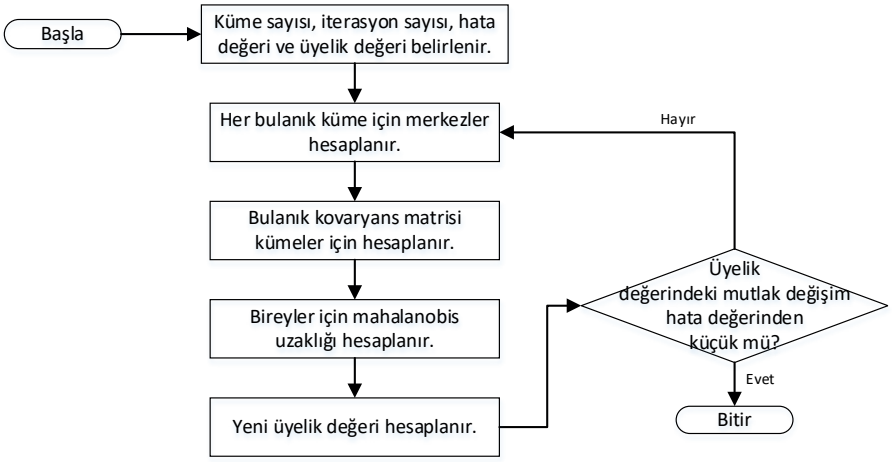
Şekil 2. Bulanık C - Ortalamalar İşlem Adımları

Bulanık C Ortalamalar ile kümelemede üyelik matrisi olumlu bir etkiye sahiptir. Üyelik matrisi belirsiz durumların tanımlayabilmektedir ve esnek bir yapıya sahiptir. Diğer kümeleme tekniklerine göre kümeler arasındaki örtüşmeleri bulması daha kolaydır (Verma ve Sharan, 2015). Ancak üyelik fonksiyonundaki işlemlerin karmaşık olması çözüm süresini uzatmaktadır. Ayrıca eşik değeri ve küme adetinin belirlenmesi aşamalarında insan müdahalesine ihtiyaç duyulmaktadır (Çeliknalça vd., 2014).

Gustafson-Kessel Algoritması

Gustafson-Kessel tarafından 1979 yılında oluşturulan bu algoritma, BCO tekniğinin mesafe normu ile genişleterek verideki değişikliklere göre kümeleme yapmaktadır (Gustafson & Kessel, 1979). BCO tekniği ile çözülmesi uygun olmayan elipsoidal kümeleri teşhis etmek için geliştirilmiştir. Bu algoritma ile belirlenen kümelerin pozitif simetrik A matrisleri bulunmaktadır. Küme biçimleri değişken ama büyüklükleri değişken değildir. GKA ile öncelikli olarak bilgileri bulunan kümelere için her bir A matrisine yönelik

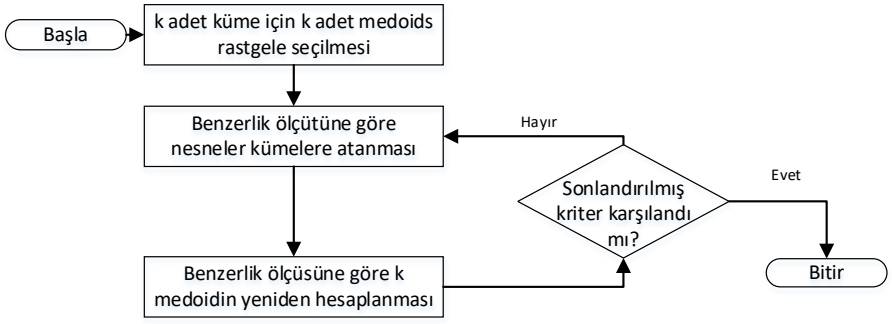
sabit d değeri tarafından oluşturulan farklı büyüklükteki kümelere izin verir. Gustafson-Kessel algoritması c-ortalamalar tipindeki amaç fonksiyonunun yinelemeli olarak optimum kılınmasına dayanır. Gustafson-Kessel Algoritmasına ait genel işlem adımları Şekil 3 ile verilmiştir (Eminov vd. 2006).



Şekil 3. Gustafson-Kessel Algoritması İşlem Adımları

K-Medoids Kümeleme Tekniği

Kaufman and Rousseeuw tarafından 1987 yılında geliştirilen bu yöntem, meloid olarak adlandırılan ve küme merkezine yakın olan temsilci nesnenin, birbirine benzeyen nesneleri aynı küme içerisinde gruplandırmaktadır (Kaufman & Rousseeuw, 1987). Nesneleri k tane kümeye bölerken, nesnelerin bağlı oldukları kümelerin merkezinde olan temsilci nesneye toplam mesafe minimum indirilmeye çalışılmakta ve k tane temsilci nesne bulunması amaçlanmaktadır (Işık ve Çamurcu, 2007). K-Medoids kümeleme yöntemine ait genel işlem adımları Şekil 4 ile verilmiştir (Nguyen, 2014).



Şekil 4. K-Medoids Ortalamalar İşlem Adımları

K-medoids ile kümeleme tekniği ile oluşturulan kümeler daha kararlıdır. Küme merkezlerininin seçiminde ilk atama ve işlem sırasının etkisi yoktur. Ancak bu yöntemde de küme sayının belirlenmesi için denemeler yapılmalı-

dır (Narayana ve Vasumathi, 2018).

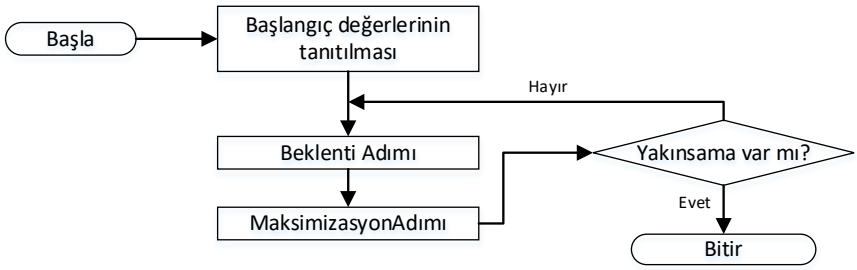
Beklenti Maksimizasyonu (Expectation Maximization - EM Algoritması)

Dempster ve arkadaşları tarafından 1977'de problemlerde yer alan belirsiz parametreleri tahmin etmek için geliştirilmiştir (Dempster vd., 1977). EM algoritması ile istatistik yöntemler ile algoritmik uygulamalar eş zamanlı kullanılarak eksik verili problemlerin çözümünde yardımcı olmaktadır. Yöntem eksik verileri hesaplamak için tahmin edilen model parametlerini kullanmaktadır. Eksik veriler tamamlandıktan sonra model parametrelerinde yinelemeli olarak hesaplanmaktadır (Şahin, 2012).

Genel olarak EM algoritması üç adımdan oluşmaktadır:

- Kayıp veriler tahmin edilmiş veriler taraşında doldurulur
- Kayıp veriler doldurulduktan sonra parametre tahmini yapılır
- Daha uygun parametre bulunana kadar iteratif olarak işlemler tekrar eder

EM algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 5 ile paylaşılmıştır (Fırat, vd. 2010).



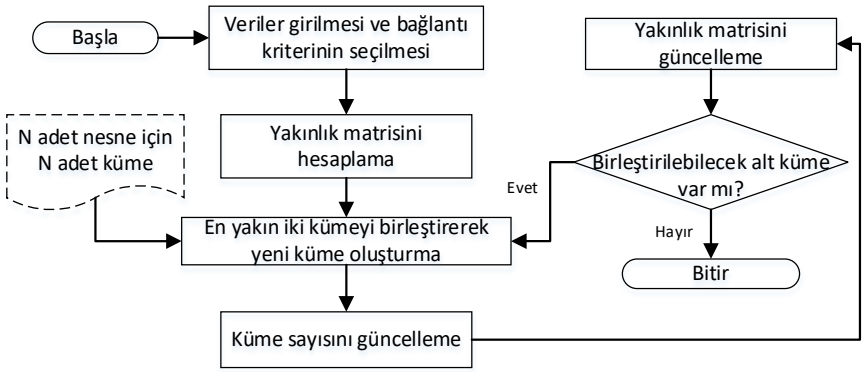
Şekil 5. EM Algoritması İşlem Adımları

EM Yönteminde, eksik verilere rağmen tahmin yaparak eksikleri doldurması ve ölçülmüş her veriyi kullanması avantaj olarak kabul edilmektedir. Elde edilen standart hataların ise gerçek standart hatalardan farklı olması, yavaş yakınsaması ve bu modelin dezavantajıdır (Allison, 2003).

Hiyararşik Kümeleme

Kümelenecek nesnelerin birbirleri arasındaki mesafe matrislerini dikkate alarak çalışmaktadır. Analiz başlarken her bir nesne küme olarak kabul edilir ve birbirine yakın nesneler birleştirilerek yeni kümeler oluşturulur (Akın, 2008). Nesnelerin birleşerek yeni küme oluşturmaları iteratif olarak devam eder ve bir nesne bir kümeye dahil olduktan sonra bir daha o kümeden ayrılmadan işlemler devam eder (Çakmak vd., 2005). Her bir adımda küme sayısı azalarak devam eder. Küme sayısı araştırmacı tarafından biliniyorsa

hiyerarşik olamayan kümeleme yöntemiyle daha hızlı sonuç alınabilmektedir (Çelik ve Kıral, 2018). Hiyerarşik Kümelemeye ait akış diyagramı Şekil 6 ile paylaşılmıştır (Palamara vd., 2011) (Zhang vd., 2015).



Şekil 6. Hiyerarjik Kümeleme İşlem Adımları

Hiyerarşik kümelemele yaklaşımının küme sayısını belirleyebilmesi bu yöntemi avantajlı kılmaktadır. Ancak bu yöntemin büyük verilerdeki çalışma zorluğu, ayrık değerlerden etkilenmesi ve bir nesnenin kümeye bağlandıktan sonra tekrardan ayrılamaması yöntemin dezavantajlı hale getirmektedir (Kuo, vd., 2002).

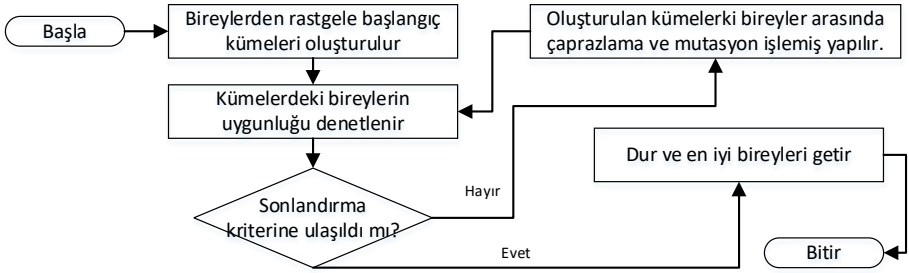
Genetik Algoritma ile Kümeleme Tekniği

Genetik algoritma (GA) yöntemi ilk olarak 1970'li yılların başında Michigan üniversitesinde görevli olan Jonh Holland tarafından geliştirilmiş (Holland, 1973), 1975 yılında ise "Doğal ve Yapay Sistemlerin Uygulanması" kitabında genetik uygulama yöntemine yer verilmiştir (Holland, 1975). Holland, Darwin'in evrim teorisinde bahsedilen canlılardaki genetik geçiş sürecini bilgisayar ortamındaki hesap yöntemlerinde kullanmak istemiştir. Holland'ın doktora öğrencisi olan Goldberg'in 1989 yılında yayınlanan kitabı ile genetik algoritmanın optimizasyon problemlerinde kullanım yöntemleri incelenmiştir (Goldberg, 1989).

Genetik algoritmalar, dört özelliği ile klasik optimizasyon yöntemlerinden ayrılmaktadır (Oğuz, 1997):

- GA, paratmetleri kodlamakta ve bu kodlar üzerinde çalışmaktadır.
- GA, arama faaliyetini bir nokta ailesi üzerinden başlar. Bu sayede yerel optimuma yakalanma riski düşüktür.
- GA, amaç fonksiyonunu doğrudan kullanır.
- GA, rastlantısal geçiş kuralı ile işlem yapar. Deterministik değildir.

GA işlemlerine ait genel akış diyagramı Şekil 7 ile verilmiştir (Maulik & Bandyopadhyay, 2000).

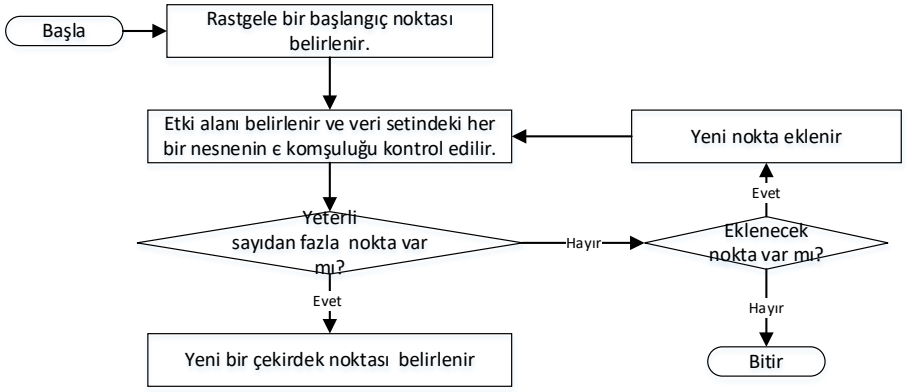


Şekil 7. Genetik Algoritmalarla Kümeleme İşlem Adımları

Genetik algoritmalar büyük problemlerde çözüm uzayının daha geniş olması, global optimimu daha kolay bulabilmesi, lokal optimuma düşme konusunda dirençli olması, fonksiyon evrimlerinin kullanılması, farklı problemlere uygulanabilmesi, büyük problemleri kolay anlayabilmesi ve uygulanabilmesi GA'yı avantajları arasındadır (Pulat ve Kocakoç, 2017). Ancak problem uzayından yeterli faydalanamaması, işlemlerin rastgele olmasına bağlı olarak işlem süresinin uzun olması dezavantajlarıdır (Ağalday, 2018).

Gürültülü Uygulamaların Yoğunluk Tabanlı Mekânsal Kümelenmesi

Bu yöntem (DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), veri yoğunluklarına bağlı olarak çalışan, Aykırı değerler içeren verilerde istenilen boyut ve şekilde kümeleri oluşturabilen bir yöntemdir (Khan, vd. 2014). 1990'lı yıllarda geliştirilen Ester ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Ester, vd. 1996). Bu yöntem coğrafi bilgi sistemleri, benzer renk ve desenlere sahip görüntü analizleri, moleküler biyoloji ve internet güvenliğini sağlamak için trafik ağındaki anomali tespitinde kullanılabilmektedir. Genel olarak 5 işlem adımına sahip bu algoritmanın (Şen, 2014) akış diyagramı aşağıdaki gibidir:



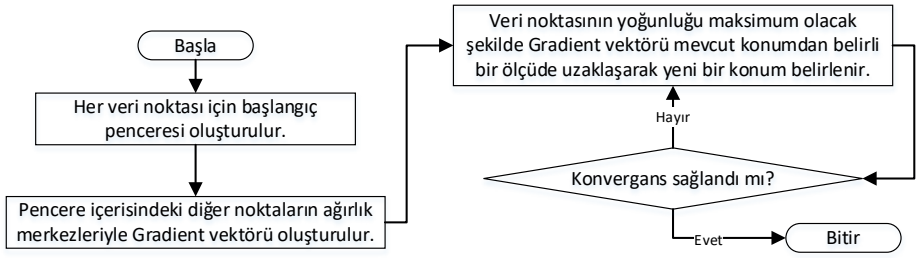
Şekil 8. DBSCAN Algoritmalsıyla Kümeleme İşlem Adımları

DBSCAN yönteminin avantajları incelendiğinde, farklı şekillerdeki kümeler için uygun olması, standart dışı aykırı noktaları tanımlayabilmesi ve

küme sayısının belirlemesini kendi yapabilmesi avantajları arasında değerlendirilebilir. Dezavantajları açısından incelendiğinde ise optimal parametre seçimini zor yapması, bazı veri seti ve problemlerdeki parametreler karşı hassasiyeti fazla olabilmektedir (Şen, 2014).

Ortalama Kaydırma Kümeleme Analizi

Yoğunluk tabanlı kümeleme yöntemi olan Ortalama Kaydırma Algoritması 1970'li yıllarda Fukunaga tarafından önerilmiştir (Fukunaga & Hostetler, 1975). Nesne takibinde kullanılabilen bu yöntem, olasılık dağılımının tepe noktasını parametrik olarak bulmaya çalışmaktadır (Turhan & Hanbay, 2015). Kümelerin şekil ve boyutu açısından esnek olan bu yöntemde küme sayısının önceden bilinmesine ihtiyaç yoktur.



Şekil 9. Ortalama Kaydırma Kümeleme Analizi Akış Diyagramı

Bu yöntemin avantajlı olduğu alanlar incelendiğinde, küme sayısının önceden belirtme zorunluluğu yoktur ve kümelerin yapısı keyfi olarak belirlenebilmektedir (Vedaldi & Soatto, 2008). Dezavantajı ise parametre seçimi ve işlemlerinin zor olması ve küçük değişikliklere karşı hassasiyetleri fazladır.

Yöntemlerin Karşılaştırmalı Analizi

Kümeleme yöntemleri, kullanıldıkları problemlere, veri setlerine ve uygulama alanlarına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Ancak genel olarak, K-Ortalamalar (K-Means), Hiyerarşik Kümeleme ve DBSCAN gibi yöntemler diğer yöntemlere göre daha sık kullanıldığı söylenebilir. Aşağıdaki tablo ile yukarıda genel hatlarıyla değinilen 9 farklı kümeleme yönteminin genel karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 1. Kümeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar	Kullanıldığı Problemler	Veri Boyutu
K-Ortalamalar Kümeleme (K-Means)	- Hızlı ve etkili	- Küme sayısını önceden belirtme gerekliliği, başlangıç merkezlerin seçim hassasiyeti	- Genel kümeleme problemleri, müşteri segmentasyonu, görüntü analizi	Orta büyüklükte ve büyük

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar	Kullanıldığı Problemler	Veri Boyutu
Bulanık C Ortalamalar Kümeleme (FC-Means)	- Esnek kümeleme, veri noktalarının farklı kümelerde olma olasılığını ifade eder	- Parametre seçimine hassas, küme sayısını önceden belirtme gerekliliği	- Görüntü işleme, biyo-informatik, belirsizlik içeren kümeleme problemleri	Orta büyüklükte ve büyük
Gustafson-Kessel Algoritması	- Kovaryans matrisinin özel durumlarını ele alabilir	- Parametre seçimine hassas, küme sayısını önceden belirtme gerekliliği	- Özellikle küme şekilleri ve boyutları konusunda esnek olması beklenen durumlar	Orta büyüklükte ve büyük
K-Medoids Kümeleme	- Aykırı değerlere karşı dirençli, medoidler küme merkezi olarak daha güvenilirdir	- Küme sayısını önceden belirtme gerekliliği, veri seti büyüklüğüne hassasiyet	- Özellikle medoid merkezi kullanımı gereken durumlar, kategorik veri setleri	Orta büyüklükte ve büyük
Beklenti Maksimizasyonu (EM)	- Eksik veri veya gizli değişkenleri ele alabilir, yumuşak kümeleme sağlar	- Parametre seçimine hassas, başlangıç değerlerine duyarlı	- Gizli değişkenlerin olduğu durumlar, eksik veri problemleri, genetik bilgi analizi	Orta büyüklükte ve büyük
Hiyerarşik Kümeleme	- Kümeleme düzeylerini görselleştirebilme, hiyerarşik yapıyı ele alma yeteneği	- Büyük veri setlerinde hesaplama maliyeti, kesim düzeyi seçimine hassaslık	- Coğrafi veri analizi, taksonomi, sınıflandırma ve öneri sistemleri	Küçük, orta ve büyük
Genetik Algoritma ile Kümeleme	- Optimize edilen bir hedef fonksiyonuyla çözümleri evrimleştirme yeteneği	- Parametre seçimine hassas, genetik algoritmaların çeşitli parametreleri	- Büyük veri setleri, genetik veri analizi, öznitelik seçimi	Orta büyüklükte ve büyük
DBSCAN	- Aykırı değerlere karşı dirençli, küme sayısını önceden belirtme gerekliliği yok	- Parametre seçimine hassas, veri yoğunluğuna duyarlı	- Coğrafi bilgi sistemleri, görüntü analizi, gürültülü veri setleri	Küçük, orta ve büyük
Ortalama Kaydırma Kümeleme (Mean Shift)	- Farklı şekillerdeki kümeleri tanımlama yeteneği, küme sayısını önceden belirtme gerekliliği yok	- Parametre seçimine hassas, yüksek boyutlu veri setlerinde maliyetli	- Görüntü analizi, nesne takibi, biyo-informatik	Orta büyüklükte ve büyü

Sonuç ve Değerlendirme

Kümeleme analizi, veri matrisindeki benzerlik gösteren değişkenler arasında anlamlı gruplar oluşturmayı amaçlayan bir yöntemdir. Bu çalışma ile

dokuz farklı kümeleme analiz yöntemlerinin detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışma, yaygın olarak kullanılan bu kümeleme yöntemlerini ele alarak, her bir yöntemin genel tanımını, işlem adımlarını, avantajlarını ve dezavantajları ve kullanılan veri tipleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu çalışma ile araştırmacılara ve veri analistlerine, farklı kümeleme yöntemlerini anlama ve seçme konusunda kapsamlı bir kaynak sunulmaktadır. Her bir yöntemin avantajları ve dezavantajları ayrıntılı bir şekilde ele alınarak, kullanıcıların hangi yöntemin hangi durumlarda daha uygun olduğunu anlamalarına yardımcı olunması ve her bir yöntemin işlem adımları akış diyagramlarıyla gösterilerek, uygulama sürecini daha anlaşılır hale getirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca farklı veri setleri ve uygulama alanlarına bağlı olarak farklılık gösterebilecek kümeleme yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi ile bu analizleri kullanacak uzmanların, veri setlerine ve problemlerine en uygun kümeleme yöntemini seçebilmeleri kolaylaşacaktır. Bu da, çalışmalar sonucu daha doğru sonuçlar elde edilmesine ve karar vericilerin daha iyi kararlar almalarına yardımcı olacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, kümeleme analizi konusunda derinlemesine bir anlayış sağlayarak, araştırmacıların ve veri analistlerinin veri setlerini daha iyi anlamalarına ve analiz etmelerine yardımcı olmaktadır. Farklı yöntemlerin avantajları ve dezavantajları hakkında bilgi sahibi olmak, doğru kararlar almak için önemlidir ve bu çalışma ile değerli bir kaynak oluşturulmuştur.

KAYNAKÇA

Ağalday, M. (2018). Genetik algoritma ile merkezi sıvanlarda tek ve çok boyutlu yakınlığa göre en iyi oturum planının oluşturulması. Fatih Sultna Mehmet Vakıf Ünicersitesi, Mühndislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilsiyarar Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, s. 41-42.

Akın, Y. (2008). Veri madenciliğine kümeleme algoritmaları ve kümeleme analizi. Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ekonometri Anabilim Dalı, İstatistik Bilim Dalı, Doktora Tezi, 10-11.

Allison, P. (2003). Missing data techniques for structural equation modeling. Journal of Abnormal Psychology, 545-557.

Berkhin, P. (2007). Survey of clustering data mining techniques. Accrue Software Technical Report, 54-54.

Bezdek, J.C., Erhlich, R., Full, W. (1984). FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. Computers & Geosciences, 191-203.

Çakmak, Z., Uzgören, N., Keçek, G., (2005). Kümeleme analizi teknikleri ile illerin kültürel yapılarına göre sınılandırılması ve değişimlerinin incelenmesi. Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi.

Çalışkan, K. (2008). Karınca Kolonisi Optimizasyonu ile Araç Rotalama Probleminin Maliyetlerinin Kümeleme Tekniği ile İyileştirilmesi. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, 43.

Çelik, C., Kıral, G. (2018). Kümeleme yöntemiyle konut tlaebinin incelenmesi: TÜrkiye il grupları üzerine bir uygulama. Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 123-138.

Çeliknalça, O. E., Demirci, R., Elmas, Ç., (2014). Renkli Görüntülerin Üç Boyutlu Histogram Yardımıyla Ayrıştırılması. Journal of Advanced Technology Sciences, 38-44.

De Oliveira, J.V., Pedrycz, W, (2007). Advances in fuzzy clustering and its applications. Wiley, West Sussex.

Dempster, A.P., Laird, N.M., Rubin, D.B., (1977). Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 1-38.

Dunn, J. (1974). A fuzzy relative ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters. Journal of Cybern, 32-57.

Eminov, M.; Ballı, S., Güler, N., Gökçe, N., Gökçe, H.E. (2006). Fuzzy Kümeleme Tabanlı Veri Keşif Sisteminin Geliştirilmesi ve Muğla İlinin Sosyo- Ekonomik Gelişmişlik Gruplarının ve Düzeylerinin Belirlenmesi. Muğla Üniversitesi Yayınları:72, Rektörlük Yayınları.

Ergin, C. (2016). Afet lojistikğinde depo yeri seçimi probleminin optimzasyon ve kümeleme teknikleri il çözülmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Endüstri Mühendisliği Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 73.

Ester, M., Krigel, H., Sander, J., & Xu, X., (1996). A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. Proc. of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, (s. 226-231). Portland, WA.

Firat, M., Dikbaş, F., Koç., C., Güngör, M., (2010). Estimation of Missing River Flows using Expectation Maximization Method. BALWOIS 2010 – Ohrid, Republic of Macedonia.

Fukunaga, K., & Hostetler, L. (1975). The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition. Information Theory, 21(1), 32-40.

Goldberg, D. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning Reading. MA : Addison-Wisley.

Gustafson, D., & Kessel, W. (1979). Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix. IEEE CDC, San Diego,CA, USA., 761-766.

Holland, J. (1973). Genetic algorithms and the optimal allocation of trials. SIAM Journal on Computing.

Holland, J. (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor.

Işık, M., Çamurcu, A.Y., (2007). K-Means, K-Medoids ve Bulanık C-Means algoritmalarının uygulamalı olarak performanslarının tespiti. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi , 31-45.

Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (1987). Clustering by Means of Medoids. Statistical Data Analysis Based on The L1–Norm and Related Methods, 405–416.

Khan, K., Rehman, S., Aziz, K., Fong, S., & Visswa, A. (2014). DBSCAN: Past, Present and Future. T. F. Technologies (Dü.). içinde Bangalore, India. doi:10.1109/ICADIWT.2014.6814687

Kuo, R.J., Ho, L.M., Hu, C.M., (2002). Integration of self-organizing feature map and K-means algorithm for market segmentation. Computers & Operations Research, 1475-1493.

Maulik, U., & Bandyopadhyay, S. (2000). Genetic algorithm-based clustering technique. Pattern Recognition, s. 1455-1465.

Narayana, G.S., Vasumathi, D., (2018). An Attributes Similarity-Based K-Medoids Clustering Technique in Data Mining. Arabian Journal for Science and Engineering, 3979–3992.

Nguyen, L. (2014). User Model Clustering. Journal of Data Analysis and Information Processing, 41-48.

Oğuz, M. S. (1997). Genetik algoritmalar. YTÜ Endüstri Mühendisliği, Bitirme Tezi.

Palamara, F., Piglione, F., Piccinini, N., (2011). Self-Organizing Map and clustering algorithms for the analysis of occupational accident databases. Safety Science, 1215–1230.

Pulat, M., Kocakoç, D., (2017). Gezgi satıcı probleminin genetik algoritmalarla çözümünde başlangıç popülasyonunun belirlenmesi. Journal Of Emerging Economies And Policy , s. 95-123.

Şahin, Ş. (2012). Büyük menderes nehri üzerindeki akım gözlem istasyonlarında eksik verilerinin tamamlanması. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi.

Şen, T., (2014). KÜMELEME VE GENETİK ALGORİTMA DESTEKLİ YAKLAŞIMLARLA KAPASİTE KISITLI ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ: PERAKENDE ZİNCİRİNDE UYGULANMASI, Yüksek Lisans Tezi. Sakarye: Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Turhan, M., & Hanbay, D. (2015). Mean Shift Based Object Tracking Supported with Adaptive Kalman Filter. 23nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), (s. 2670-2673). Malatya. doi:doi: 10.1109/SIU.2015.7130438

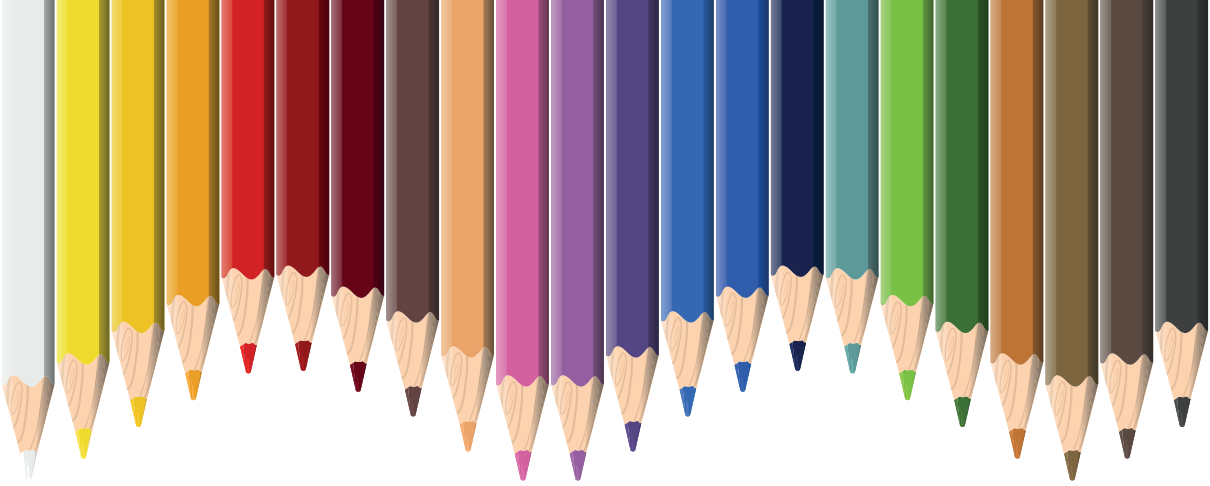
Vedaldi, A., & Soatto, S. (2008). Quick Shift and Kernel Methods for Mode Seeking. Computer Vision–ECCV, 10th European Conference on Computer Vision. Berlin Heidelberg.

Verma, H., Sharan, A., (2015). An Improved Intuitionistic Fuzzy C-means Clustering Algorithm İncorporating Local İnformation For Brain İmage Segmentation. Applied Soft Computing Journal.

Wang, Z., Zhao, N., Wang, W., Tang, R., Li, S., (2015). A Fault Diagnosis Approach for Gas Turbine Exhaust Gas Temperature Based on Fuzzy C-Means Clustering and Support Vector Machine. Mathematical Problems in Engineering.

Ye, N. (2003). The Handbook of Data Mining. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, s. 248-273.

Zhang, P., Wu, X., Wang, X., Bi, S., (2015). Short-Term Load Forecasting Based on Big Data Technologies. Chinese Society for Electrical Engineering Journal of Power and Energy Systems, 59-67.



Bölüm 5

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİNDE ÇOKLU CİSİM DİNAMİĞİ VE SONLU ELEMANLAR YONTEMİNİN BÜTÜNLEŞİK KULLANIMI VE OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA UYGULANMASI

Mehmet ÇALIŞKAN[1]

1 Prof. Dr. Mehmet ÇALIŞKAN, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-7835-9414

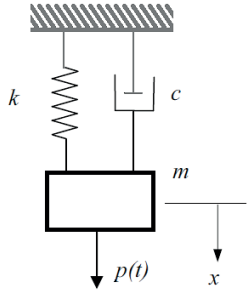
1. TEORİ VE METOTLAR

1.1. Makine Dinamiği

Makine dinamiği ana bilim dalı, dış yüklerin etkisiyle oluşan cisim tepkilerini, Newton hareket yasalarını kullanarak inceler. Şekil 1 de görülen bir kütle-yay-sönümleyici sistemi buna tipik bir örnek olarak verilebilir [1]. Bu sistem için Newton'un ikinci kanunu ile;

$$\sum F = p(t) - kx - c\dot{x} = m\ddot{x} \tag{1}$$

denklemi yazılır ki, burada F sisteme etkiyen toplam kuvvet, $p(t)$ cisme etkiyen kuvvet fonksiyonu, k yay sabiti, c sönüm sabiti, x cismin yer değiştirmesi, $\dot{x}$ cismin hızı, $\ddot{x}$ cismin ivmesi *ve* m cismin kütlesidir.

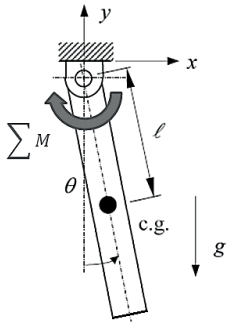


Şekil 1. Kütle yay sönümleyici sitemi.

Makine dinamiğinde, rijit bir cisim için, kütle özellikleri (toplam kütle, kütle merkezi, atalet momenti, vb.) dikkate alınır. Şekil 2 de görülen bir sarkaç için aşağıdaki hareket denklemi kullanılır.

$$\sum M = -mgl\sin\theta = J\ddot{\theta} = ml^2\ddot{\theta} \tag{2}$$

Burada M sisteme etkiyen toplam moment (tork), J sarkacın polar atalet momenti, m sarkacın kütlesi, g yerçekimi ivmesi, $\ddot{\theta}$ sarkacın açısal ivmesi, c. g. sarkacın ağırlık merkezi ve l ise sarkacın ağırlık merkezinin dönme merkezine uzaklığıdır.



Şekil 2. Sarkaç (pendulum) sistemi.

1.2. Çoklu Cisim Analizi (Multibody Analysis- MBA)

Birbirine bağlı cisimlerin mekanik davranışının sistematik olarak ele alınması, mekanik alanında çok sayıda önemli çoklu cisim formülasyonuna yol açmıştır. Çok gövdeli bir sistemin elemanları Newton (serbest cisim yöntemi) ve Euler (rijit gövde varsayımı) tarafından ele alınmıştır. Euler cisimler arasındaki reaksiyon kuvvetlerini tanıtmış, daha sonra sadece Lagrange'ın minimal koordinatlara dayanan formülasyonlarından ve kısıtlamalar getiren ikinci bir formülasyondan bahsetmek için bir dizi formülasyon türetilmiştir.

Yöntem temel olarak, cisimlerin hareketi kinematik davranışlarıyla tanımlanır. Dinamik davranış, uygulanan kuvvetlerin dengesinden ve momentum değişim oranından kaynaklanır. Günümüzde çoklu cisim terimi, özellikle robotik ve taşıt dinamiği olmak üzere çok sayıda mühendislik araştırma alanıyla ilgilidir. Önemli bir özellik olarak, çok gövdeli sistem formülasyonları, muhtemelen birbirine bağlı binlerce gövdenin keyfi

hareketini modellemek, analiz etmek, simüle etmek ve optimize etmek için genellikle algoritmik, bilgisayar destekli bir yol sunar.

Hareket denklemleri, çoklu cisim sisteminin dinamik davranışını tanımlamak için kullanılır. Her çok gövdeli sistem formülasyonu, arkasındaki fizik aynıyken, hareket denklemlerinin farklı bir matematiksel görünümüne yol açabilir. Kısıtlanmış cisimlerin hareketi, temel olarak Newton'un ikinci yasasından kaynaklanan denklemler aracılığıyla tanımlanır. Denklemler, kısıtlama koşullarının eklenmesiyle tekil cisimlerin genel hareketi için yazılmıştır. Genellikle hareket denklemleri Newton-Euler denklemlerinden (3) veya Lagrange denklemlerinden (4) türetilir.

$$M(q)\ddot{q} - Q_v + C_q^T \lambda = \mathrm{F} \tag{3}$$

$$C(q, \dot{q}) = 0 \tag{4}$$

Burada; q genelleştirilmiş koordinatları, M(q) kütle matrisini, C sınır koşullarını, C(q) Jacobian matrisini, λ vektörü ise Lagrange çarpanını ifade eder. Rijit bir cisimde muhtemel koordinatlar iki kısma ayrılır, formülasyonu şöyledir:

$$q = [u, \Psi]^T \tag{5}$$

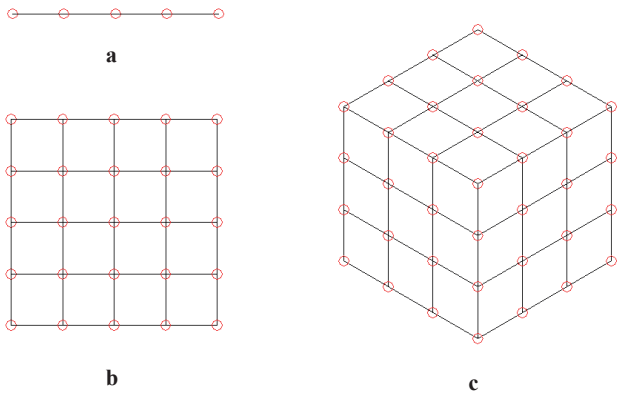
Burada, u ötelenme hareketini, Ψ ise dönme hareketini ifade eder [2].

Cisim sayısının birden fazla olduğu (çoklu cisim- multibody) mekanik sistemlerde (mekanizmalar) kinematik ve dinamik teorilerin güçlü bir uygulayıcısı olarak Creo programının Mechanism Design Extension (MDX) ve Mechanism Dynamics Option (MDO) modülleri kullanılabilir. Mechanism

Design modülü Creo arayüzü ile bütünleşik olduğu için, modüller arası geçişler sorunsuzdur. Program içinde tanımlanan tüm uzuvların (body) kısıt ve bağlantıları otomatik olarak Mechanism Design modülü üzerinden yapılabilmektedir. Mechanism Design modülüne Creo içindeki menüler ve pencereler üzerinden de erişilebilir. Creo Assembly ve Mechanism Design modülleri aynı montaj dosyalarını kullanır. Uzuv geometrisi dinamik hareket analizinde kütle özellikleri (eylemsizlik tensörü ve jirasyon yarıçapları) hesaplamaları gerekir ve Mechanism Design modülü, Newton & Euler uzuv tepki kuvvet ve momentlerinin hesaplarından D'Alembert prensibiyle kuvvet analizlerine, karmaşık şekilli uzuvların çakışma kontrolleri ve hareket uzayı analizlerinden, belirli noktaların hareket yörüngelerine varıncaya kadar çok geniş bir yelpazede analizler yapmanın mümkün olduğu güçlü bir modüldür.

1.2. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)

Makine mühendisliğinde sonlu elemanlar analizi (SEA), mekanik sistemlerin bilgisayar ortamında simüle edilerek sorunların tespit edildiği bir süreçtir. Sonlu elemanlar metodu (ing. Finite element method- FEM), analiz edilecek cismin, sonlu boyutta çok sayıda elemana ayrılarak analiz edildiği bir nümerik metottur [3]. Bir parçanın veya sistemin mukavemet ve davranış özelliklerini gerilme, titreşim ve sapma gibi koşullarla hesaplamak için kullanılır. Fiziksel karmaşıklıklar ve matematiksel sürekliliklere sahip büyük yapıları daha küçük ve yönetilebilir bölümlere ayırarak çalışır ve her alan kendi içinde yerel alanın malzeme özelliklerini temsil eder. Küçük bölümlere parçalayarak yapının nasıl tepki vereceği anlaşılır [4]. Sonlu elemanlar metodunda, ele alınan cismin sonlu boyutta çok sayıda elemana bölündüğü varsayılır. Bir boyutlu cisimler düğüm noktalarıyla, iki boyutlu cisimler sınır çizgileriyle, üç boyutlu cisimler ise alanlarla bir birinden ayrılırlar. Bu ayırım biçimleri genel olarak Şekil 3'de gösterilmiştir [1].



Şekil 3. Sonlu elemanlara bölünmüş cisim

a). Doğrusal sonlu elemanlara bölünmüş 1 boyutlu cisim. b). Dikdörtgen sonlu elemanlara bölünmüş 2 boyutlu cisim. c). Dikdörtgen prizma elemanlara bölünmüş 3 boyutlu cisim.

Şekil 3'a, b ve c'de düğüm noktaları küçük dairelerle temsil edilmektedir. İki ve üç boyutlu cisimlerde eleman boyutları ya da şekilleri birbirinden farklı olabilir. Düğüm noktaları ise sınır çizgilerinin kesişim yerlerindedir. Bu ayırma işlemi sonunda cisim, sonlu sayıda elemandan ve bunları birbirine bağlayan düğümlerden oluşmuş bir yapıya dönüşecektir. Düğümleri, elemanları birbirine bağlayan ve onları bir arada tutan bir somun – cıvata bağlantısı gibi düşünmek mümkündür. Düğümlerin kaldırılması durumunda bütün elemanlar birbirlerinden ayrılırlar. Bu durumda komşu elemanlar arasında fiziksel bir süreksizlik meydana gelir. Metodun çözümlemesinde bir sonraki adım, cismi oluşturan elemanların her birinin eleman rijitlik matrisini ifade etmektir. Daha sonra bu matrisler toplanarak cisme ait tümel rijitlik matrisini meydana getirirler. Bu toplama işleminde cismin sonlu eleman modelindeki bütün düğümlerde kuvvetlerin dengesi ve deformasyonların sürekliliği sağlanmalıdır. Buradan aşağıdaki matris denklemine ulaşılır:

$$[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{U}\} = \{\boldsymbol{F}\} \tag{6}$$

Burada,$[K]$, cismin tümel direngenlik matrisini, $\{U\}$, bütün düğümlerin yer değişim miktarlarını ve $\{F\}$ ise tümel kuvvet vektörü olup bütün düğümlere uygulanan dış kuvvetleri temsil etmektedir. $[K]$, elemanlara bölünmüş cisimde birim yer değiştirme yaptıracak kuvveti ifade eder. Söz konusu cisim bir yaya benzetilecek olursa burada $[K]$, cismin rijitliği, yani yay sabiti yerini alacaktır. Bu açıdan bakıldığında sonlu elemanlar metodu "cismin rijitlik bakımından analiz edildiği bir metottur" denilebilir. Cisme etki eden dış kuvvetler ve sınır şartları altında düğüm yer değiştirmeler için $\{U\}$ vektörü oluşturulur. Yer değiştirmelerden de zorlanma (ε) ve gerilmeler (σ ve τ) hesaplanabilir. Tasarım aşamasında modellemenin sağlanması ve optimize edilmesi FEM yazılımları ile kolaylaşır. Elastisite teorisi için (Elastik bölgede, Hook yasası uyarınca) zorlanma – yer değiştirme bağıntıları,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \tag{7}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{8}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \tag{9}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \tag{10}$$

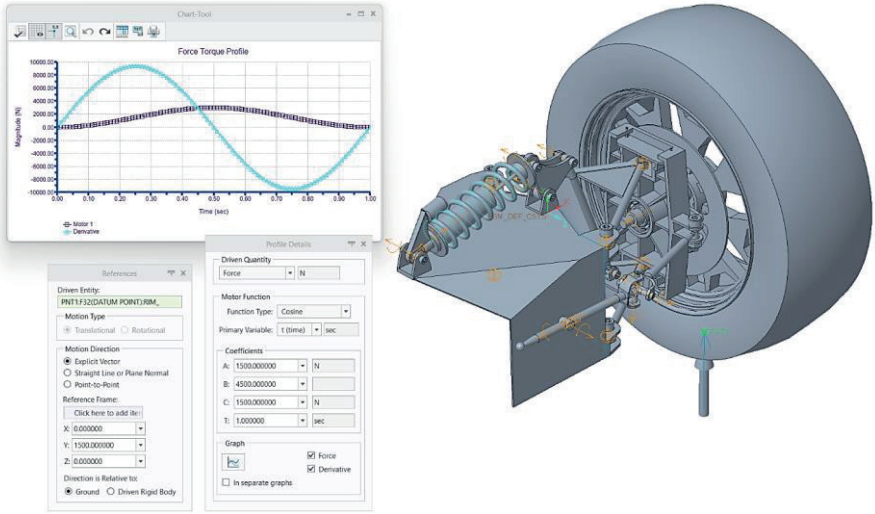
$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \tag{11}$$

Olarak ifade edilir. Burada $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ ve γ_{xy} eğilme gerinmeleri, γ_{xz} ve γ_{yz} ise kayma gerinmeleridir.

2. OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMASI

Ar-Ge projelerinde, ön tasarım süreci sonrasında ortaya çıkan mekanik sistemin beklenen çalışma koşullarında emniyetli ve doğru görev yapabilir olup olmadığını anlamanın tek yolu, mekanik sistemi işletme yükleri altında doğrulamaktır (test etmektir). Bunu yapabilmek için ise sistemi oluşturan tüm uzuvların bağlantı yerlerinde (döner, kayar ve yuva mafsalları, cıvata ve pim bağlantıları) maruz kaldıkları yük ve sınır koşullarını hesaplamak gerekir. Bu karmaşık işlemlerin klasik makine dinamiği yöntemleriyle anlık olarak hesaplanması oldukça zordur. Çünkü mekanizma hareketleri anlık değil, belli bir zaman boyunca gerçekleştiği için, uzuvlarda tek bir yük senaryosu yerine, öngörülen interval (ara değer) sayısı kadar yük paterni ortaya çıkar. Hele sistem iki boyutlu bir düzlemde değil de üç boyutlu uzayda hareket ediyorsa işlemler daha karmaşıklaşır. Kuvvetleri kâğıt üzerinde doğru şekilde uygulamak ise diğer bir önemli sorundur. İşte bu mecburi sebepler, Creo gibi analiz programlarının geliştirilmesini sağlamıştır.

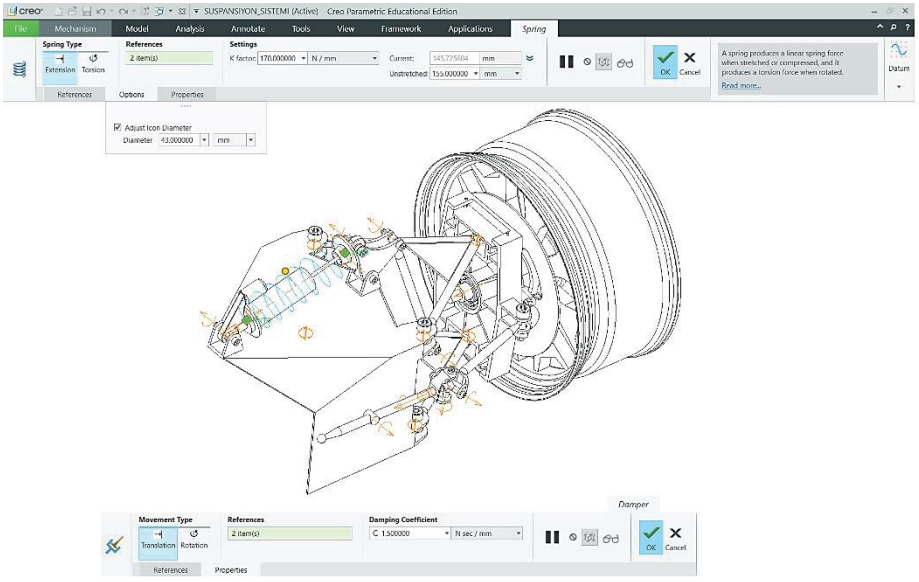
Bu çalışmada, teknik özellikleri ek1 ve ek2 de belirtilen bir otomobil süspansiyon sisteminin prototip imalatı öncesinde, bilgisayar ortamında yol tepki kuvvetleri hesaplanmış, sonrasında ise elde edilen bulgular kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile mukavemet analizleri gerçekleştirilmiş ve tasarım doğrulamaları yapılmıştır. İşlemlerde Creo Parametric, Creo Mechanism ve Creo Simulate modülleri kullanılmıştır. Taşıtın toplam ağırlığı 6000N olarak kabul edilmiş olup, tek süspansiyon sistemi için bu değerin ¼ ü alınmıştır. Engebeli yollarda sisteme yoldan etkiyen yükün 2G koşullarında olduğu varsayılarak şekil 4'deki yük senaryosu oluşturulmuştur.



Şekil 4. Varsayılan yol yükü.

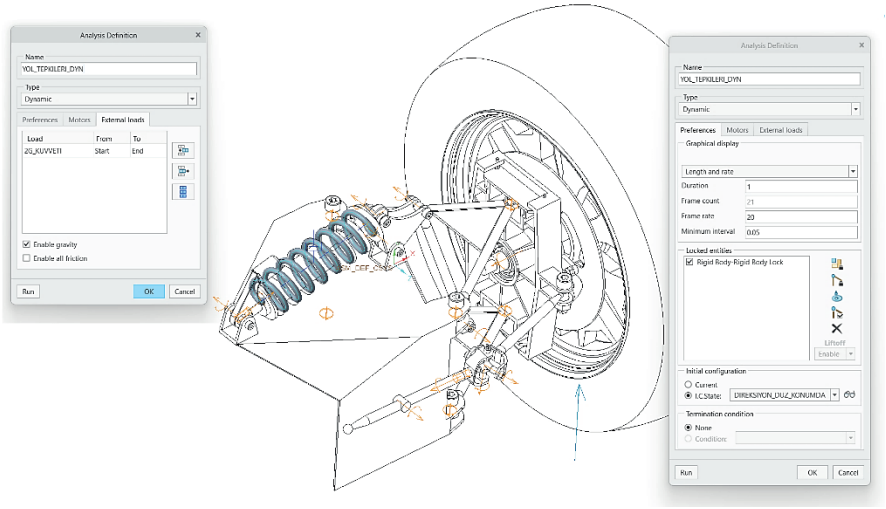
2.1. Dinamik Analiz

Süspansiyon sisteminde görev yapacak amortisörün teknik değerleri şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5. Süspansiyon sistemi amortisörünün teknik değerleri.

Yapılacak dinamik analiz senaryosuna ait sınır koşulları şekil 6 da görülmektedir. Buna göre, yol yükü 1 saniye süre ile, sistem kartezyen koordinat sistemi +Y ekseni doğrultusunda, lastiğin yola temas eğrisinin orta noktasından uygulanacaktır. Tüm parçaların ağırlıkları dahil, mafsal sürtünmeleri ise ihmal edilmiştir. Analizde 20 interval (ara değer) hesaplanacaktır. Sistemin kararsızlığa sebep olabilecek serbestlik dereceleri kilitlenmiştir.



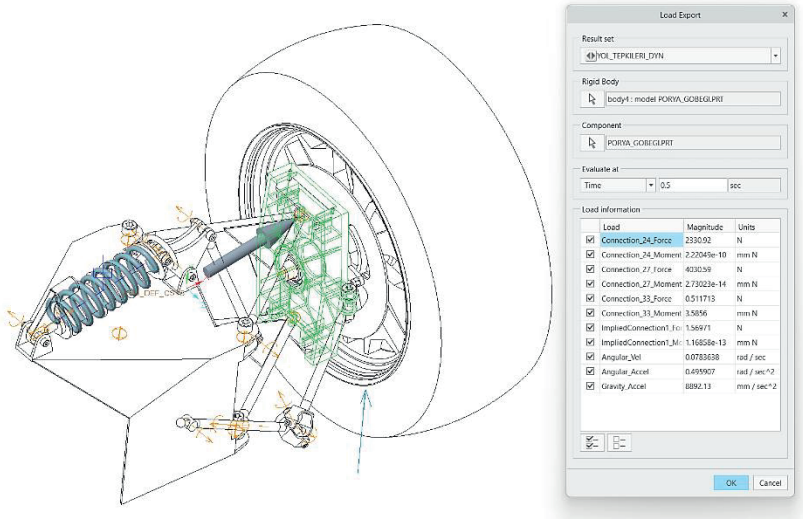
Şekil 6. Dinamik analiz girdileri.

2.2. Hesaplanan Uzuv Tepkilerinin Sonlu Elemanlar Modülüne Aktarılması

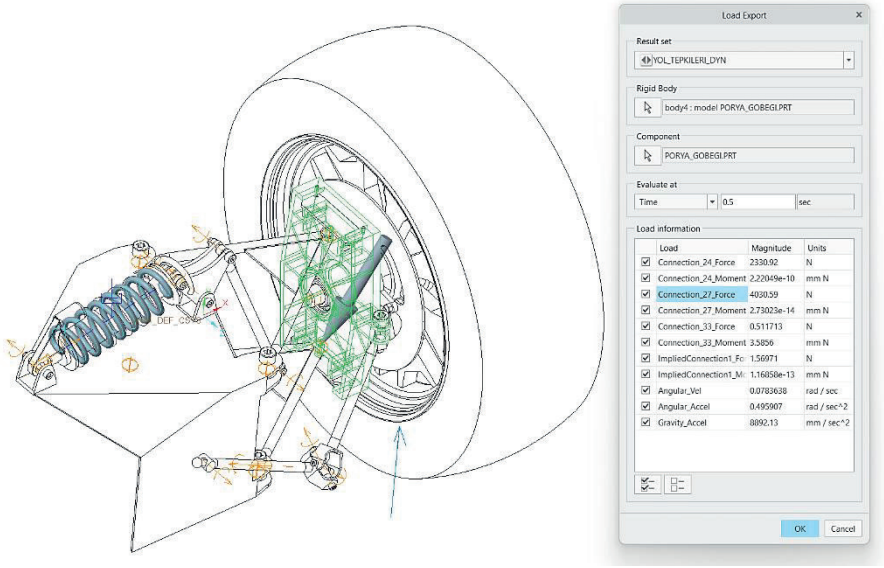
Şekil 7 de, dinamik analiz ile elde edilen uzuv tepki kuvvet ve momentlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile mukavemet analizi için Simulate modülüne aktarım işlemi görülmektedir. Bu işlem, tasarım doğrulaması gerektiren her mekanizma uzvu için yapılmalıdır. Analizde 20 adet ara değer hesaplandığı göz önüne alınırsa, her bir uzuv için 20 * uzuv sayısı kadarlık bir yük paterninin ortaya çıkacağı görülür. Yöntemi özetlemek adına bu çalışmada, yol yükünün maksimum değere ulaştığı 0.5 s anında porya göbeği

(sanayi diline porya olarak evirilmiş olmakla birlikte kelimenin kökeni poyradır) uzuv tepkilerinin aktarımı sunulmuştur.

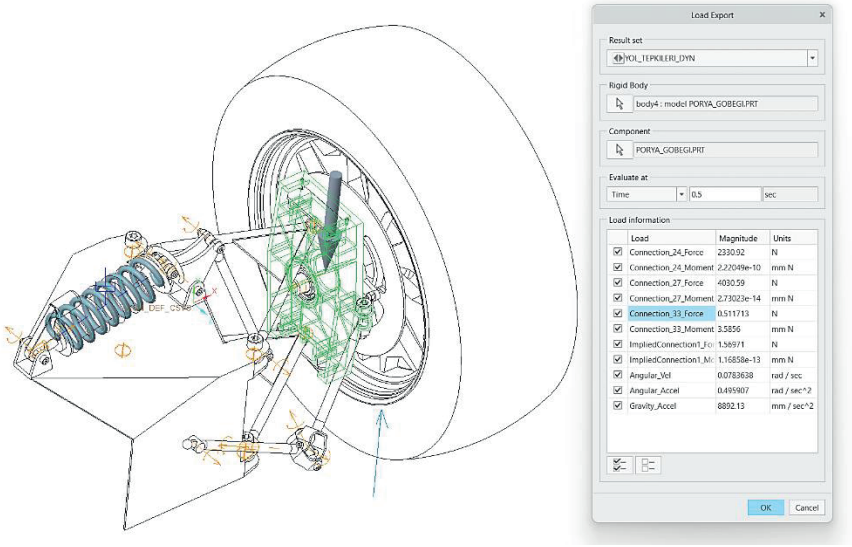
Şekil 7, 8, 9 ve 10 da porya göbeğinin mafsal tepki kuvvet ve momentleri görülmektedir. (Önemsiz değerde olanlar ihmal edilmiştir.)



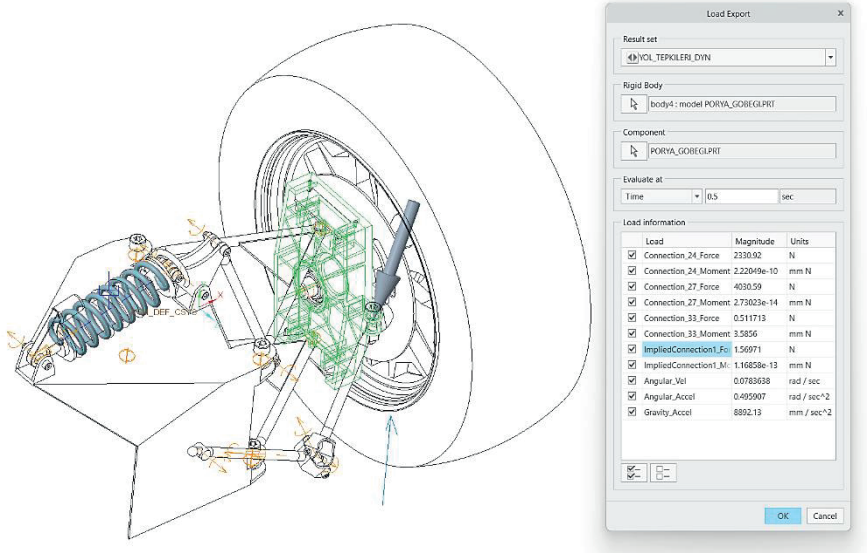
Şekil 7. Porya göbeği üst mafsal tepki kuvveti.



Şekil 8. Porya göbeği alt mafsal tepki kuvveti.



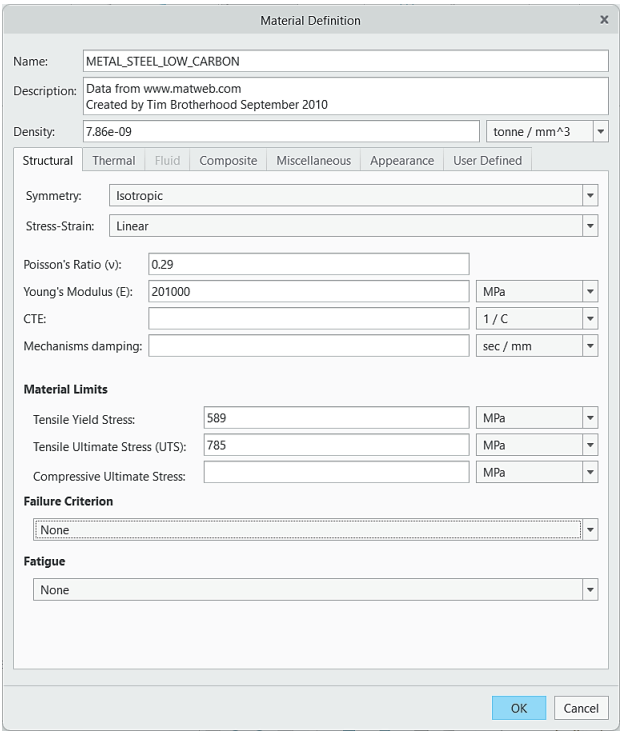
Şekil 9. Poyra göbeği orta mafsal tepki kuvveti.



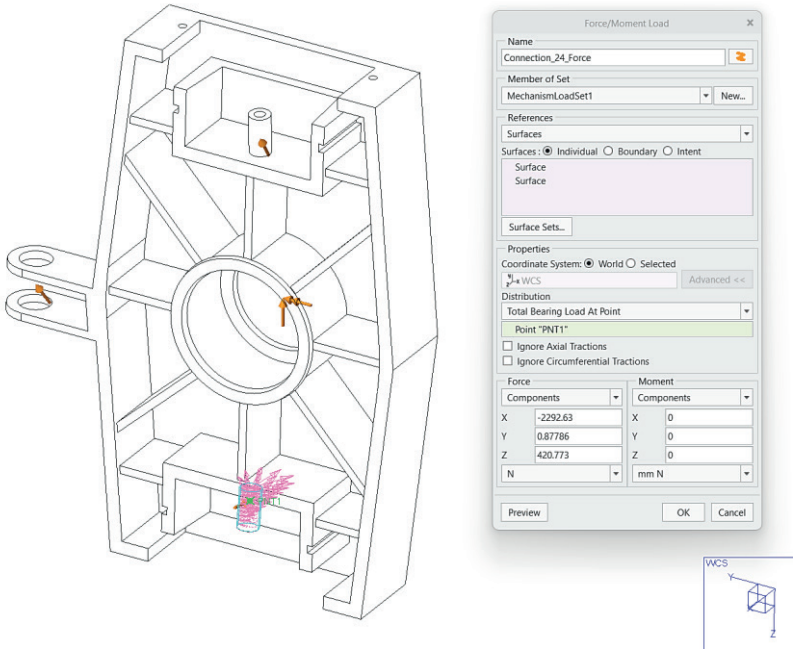
Şekil 10. Poyra göbeği direksiyon mafsalı tepki kuvveti.

2.3. Sonlu Elemanlar Modülünde Tasarım Doğrulama Analizi

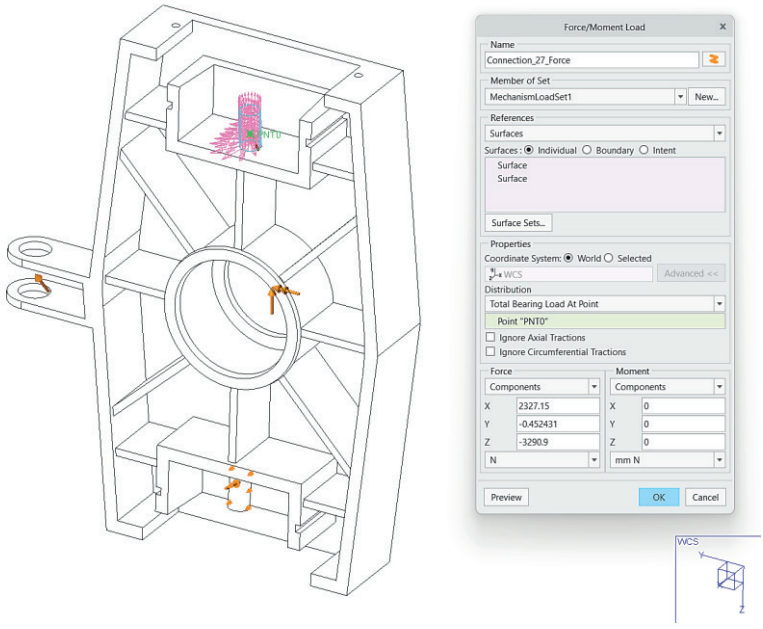
Şekil 11'de Porya göbeği modeli için koşturulacak analiz için malzeme özellikleri girdileri, şekil 12, 13, 14, 15 ve 16 da ise, mafsal tepkileri görülmektedir.



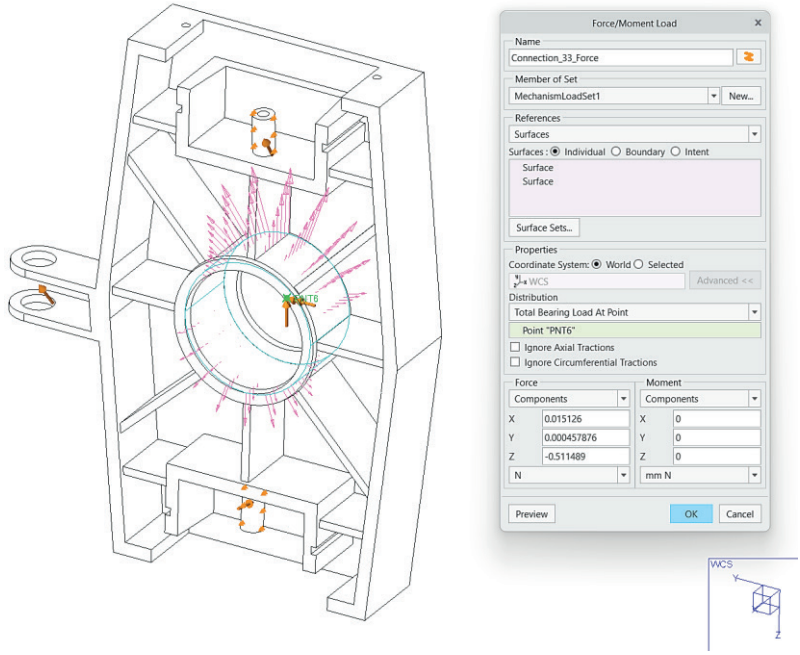
Şekil 11. Malzeme tanımlama kartı.



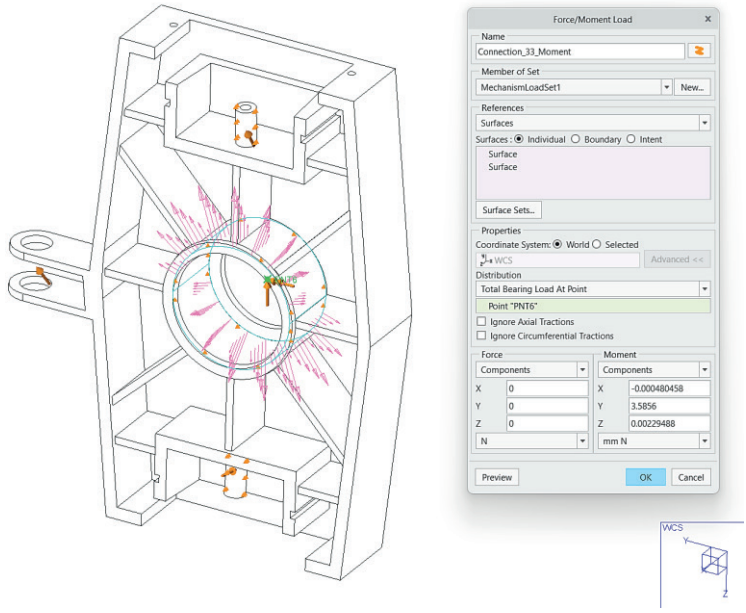
Şekil 12. Mafsal tepkileri (Alt)



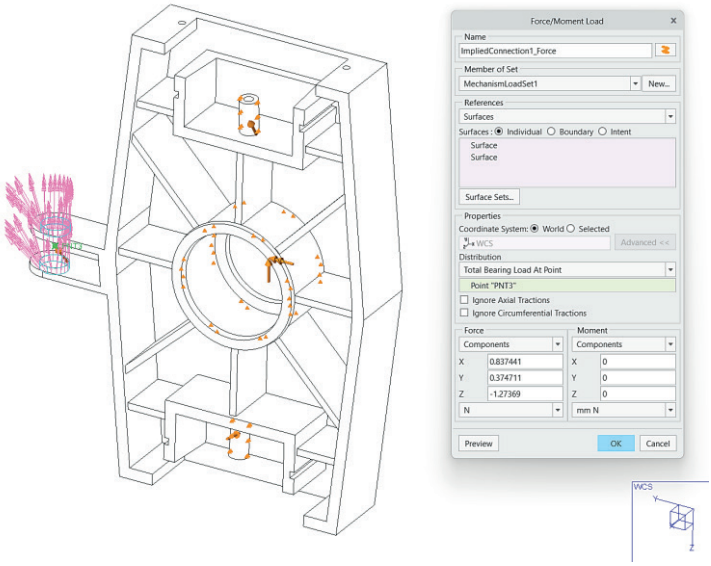
Şekil 13. Mafsal tepkileri (Üst)



Şekil 14. Mafsal tepkileri (Orta-Kuvvet)

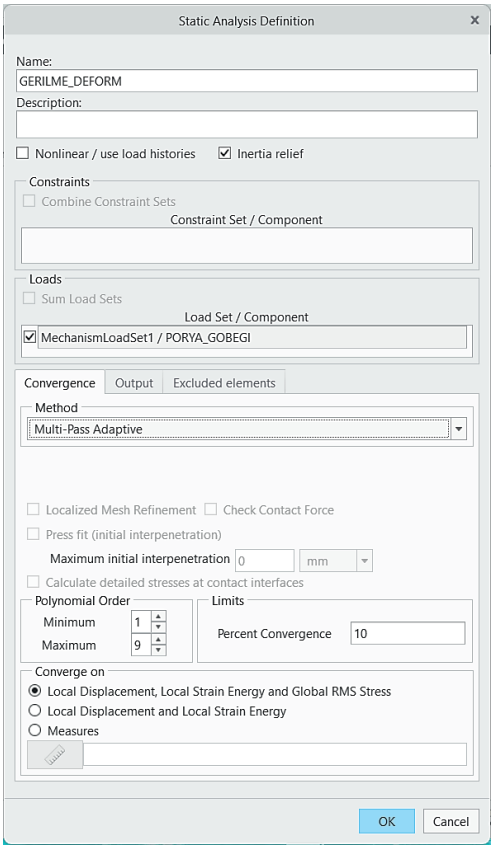


Şekil 15. Mafsal tepkileri (Orta-Moment)



Şekil 16. Mafsal tepkileri (Direksiyon)

Şekil 17 de, yapılacak sonlu elemanlar analizinin tanımlama kartı görülmektedir.

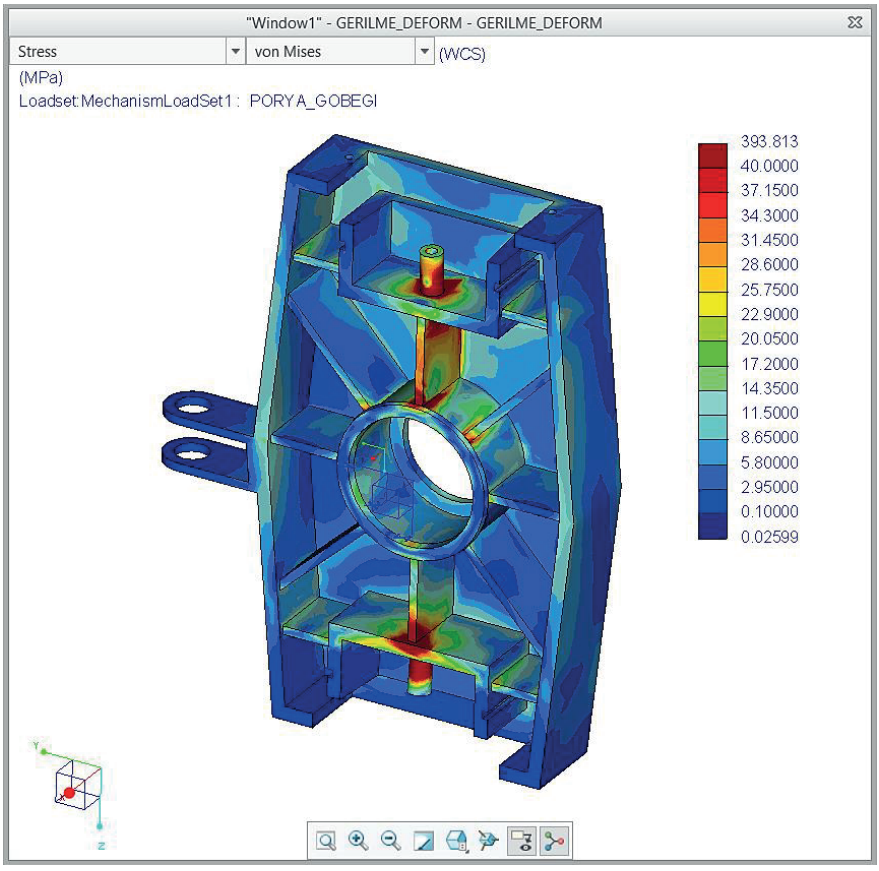


Şekil 17. Sonlu elemanlar analizi tanımlama tablosu.

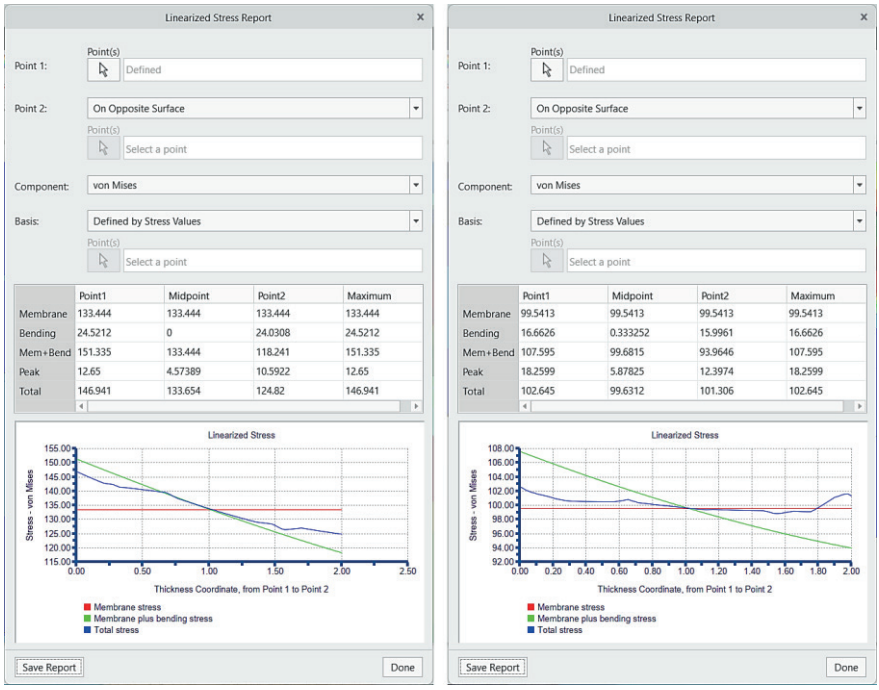
3. SONUÇLAR

Şekil 18 de porya göbeği parçasında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı görülmektedir. Analiz sonucuna göre, maksimum gerilme değeri malzemenin akma sınırını aşmamıştır. Alt ve üst mafsallardaki yerel bölgelerde doğrusallaştırılmış gerilme ölçümleri yapılarak gerilme konsantrasyonlarının hangi düzeyde olduklarına bakılmıştır (şekil 19). Kuvvetin mekanizma tekil uygulama noktası ile karşısında bulunan iz düşüm yüzeyindeki yansıma noktasını birleştiren doğru, kullanılan yerel bölgeyi tanımlar. Daha detaylı incelemeler için bu sonuç alma bölgeleri çoğaltılabilir. Eldeki veriler ışığında kritik bölgelerde gerilme yığılması oluşmadığı söylenebilir. Fakat, dinamik

analizin ürettiği 20 farklı yük diyagramı mevcut olduğu için, projelendirme sürecinde her diyagram senaryosu içi ayrı sonlu elemanlar analizi yapılarak bunların içinden en kritik olanı seçilmelidir. Sonlu elemanlar analiz sonuçları Creo 'da kütle, hacim ya da maliyet minimizasyonu ya da maksimizasyonu gibi amaçlar için optimize edilebilir. Topolojik optimizasyon yapılabilir.



Şekil 18. Sonlu elemanlar analizi eşdeğer gerilme dağılımı.



Şekil 19. Sonlu elemanlar doğrusallaştırılmış gerilmeler (Sol: Üst mafsal bölgesi, Sağ: Alt mafsal bölgesi).

KAYNAKLAR

[1] M. Çalışkan, Creo ile Bilgisayar Destekli Mühendislik, Değişim Yayınları, ISBN: 978-625-8466-21-8, Sakarya 2022.

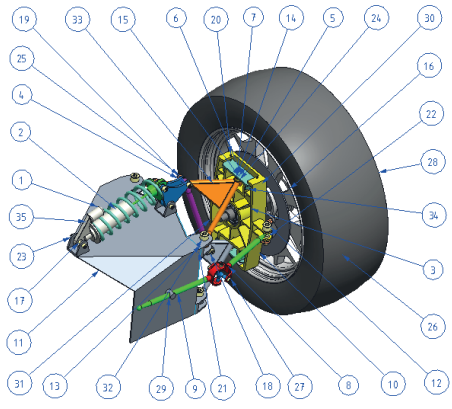
[2] J. Wittenburg, Dynamics of Multibody Systems, Springer ISBN: 978-3-540-73913-5 Berlin, (2008).

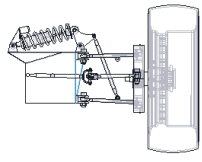
[3] B.Nath, çeviren Doç. Dr. Durmuş Günay, Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri. Sakarya Üniversitesi Matbaası, Adapazarı,1993.

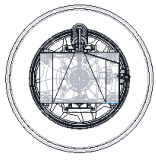
[4] Ana Pavlovic, Cristiano Fragassa, Giangiacomo Minak (2017). Buckling Analysis of Telescopic boom: Theoretical and Numerical Verification of Sliding Pads. ISSN 1330-3651(Print), ISSN1848-6339(Online) DOI: 10.17559/TV-20160510143822

EKLER

Ek1. Taşıt süspansiyon sistemi montaj resmi ve parça listesi







SIRA	PARCA ADI	ADET	MALZEME
1	AMORTISOR_GOVDESI	1	METAL_STEEL_LOW_CARBON
2	AMORTISOR_PISTONU	1	METAL_STEEL_LOW_CARBON
3	BILYALI_RULMAN	2	
4	BRAKET	1	STEEL
5	DIN7980-3_	2	METAL_STEEL_LOW_CARBON
6	DIN7980-5_	5	METAL_STEEL_LOW_CARBON
7	DINENISO7092-3_	2	METAL_STEEL_LOW_CARBON
8	DIREKSIYON_ROTU_KISA_	1	METAL_STEEL_LOW_CARBON
9	DIREKSIYON_ROTU_UZUN_	1	METAL_STEEL_LOW_CARBON
10	DISK	1	STEEL
11	GOVDE	1	METAL_STEEL_LOW_CARBON
12	ISO14579-M10X35-10_9_	1	10_9
13	ISO14579-M10X35-12_9_	4	12_9
14	ISO14579-M3X25-12_9_	2	12_9
15	ISO14579-M5X16-10_9_	5	10_9
16	ISO14579-M5X25-12_9_	5	12_9
17	ISO14579-M5X35-12_9_	2	12_9
18	ISO14579-M6X25-12_9_	1	12_9
19	ISO14579-M6X30-12_9_	2	12_9
20	ISO2338-3M6X18-ST_	4	METAL_STEEL_LOW_CARBON
21	ISO7040-M10-5_	4	5
22	ISO7040-M10-8_	1	8
23	ISO7040-M5-5_	2	5
24	ISO7040-M5-8_	5	8
25	ISO7040-M6-5_	3	5
26	JANT	1	AL.2014
27	KARDAN_KAPLINI_	1	
28	LASTIK	1	RUBBER_SILICON
29	MAFSAL	1	METAL_STEEL_LOW_CARBON
30	PORYA	1	SS
31	PORYA_GOBEGI	1	AL.2014
32	ROT	1	STEEL
33	SALINCAK	2	STEEL
34	SALINCAK_KILIDI	2	METAL_STEEL_LOW_CARBON
35	YAY	1	METAL_STEEL_LOW_CARBON

CIZEN	ADI	TARIH	KURULUS
PROF. DR. M. CALISKAN	SUSPANSIYON SISTEMI	15.12.2023	SAKARYA UYG. BL. UNI. MAK. MUH. BL.

Ek 2. Taşıt süspansiyon sistemi kütle analizi ve eylemsizlik ile ilgili hesaplamalar

MASS PROPERTIES OF THE ASSEMBLY SUSPANSIYON_SISTEMI

VOLUME = 5.3026404e+06 MM^3
SURFACE AREA = 2.3636736e+06 MM^2
AVERAGE DENSITY = 3.4683302e-09 TONNE / MM^3
MASS = 1.8391308e-02 TONNE
CENTER OF GRAVITY with respect to _SUSPANSIYON_SISTEMI coordinate frame:
X Y Z 1.9161971e+02 -5.8960466e+01 4.5733741e+00 MM

INERTIA with respect to _SUSPANSIYON_SISTEMI coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 5.3629559e+02 2.5609178e+02 4.1907663e+00
Iyx Iyy Iyz 2.5609178e+02 1.2533456e+03 4.9888911e+00
Izx Izy Izz 4.1907663e+00 4.9888911e+00 1.3212298e+03

INERTIA at CENTER OF GRAVITY with respect to _SUSPANSIYON_SISTEMI coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 4.7197654e+02 4.8307019e+01 2.0307963e+01
Iyx Iyy Iyz 4.8307019e+01 5.7766684e+02 2.9706805e-02
Izx Izy Izz 2.0307963e+01 2.9706805e-02 5.8200136e+02

PRINCIPAL MOMENTS OF INERTIA: (TONNE * MM^2)
I1 I2 I3 4.5049434e+02 5.8121849e+02 5.9993191e+02

ROTATION MATRIX from _SUSPANSIYON_SISTEMI orientation to PRINCIPAL AXES:

0.92526	-0.03372	-0.37783
-0.35143	-0.45116	-0.82034
-0.14280	0.89181	-0.42929

ROTATION ANGLES from _SUSPANSIYON_SISTEMI orientation to PRINCIPAL AXES (degrees):
angles about x y z 117.624 -22.200 2.087

RADII OF GYRATION with respect to PRINCIPAL AXES:
R1 R2 R3 1.5650866e+02 1.7777202e+02 1.8061120e+02 MM

MASS PROPERTIES OF COMPONENTS OF THE ASSEMBLY
(in assembly units and the _SUSPANSIYON_SISTEMI coordinate frame)

DENSITY MASS C.G.: X Y Z

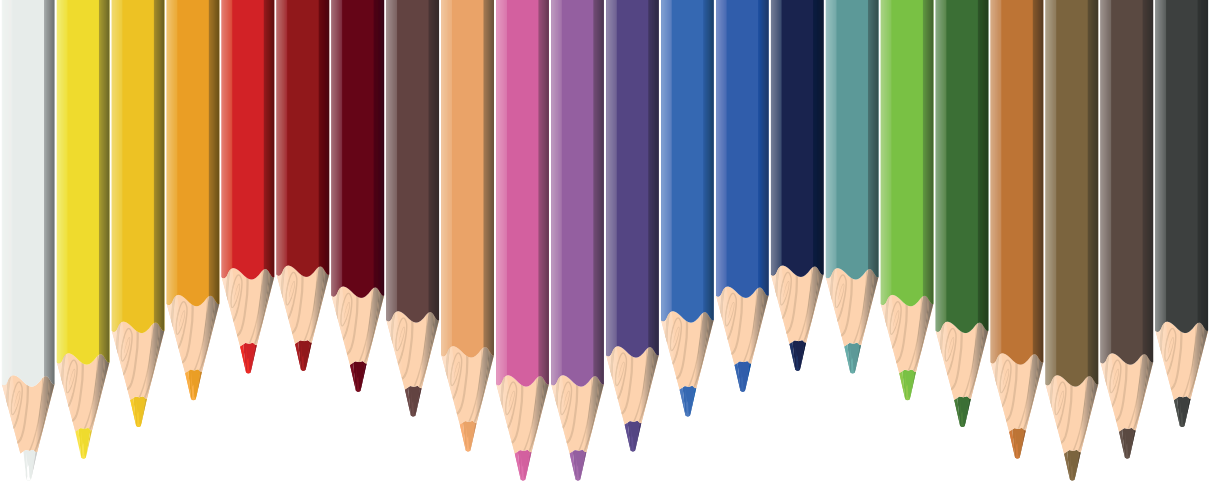
GOVDE MATERIAL: METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 2.01873e-03 -5.93137e+01 -3.94159e+01 2.33228e+01
AMORTISOR_GOVDESI MATERIAL: METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 3.60455e-04 -1.63897e+02 5.18618e+01 0.00000e+00
BRAKET MATERIAL: STEEL
7.82708e-09 1.33145e-04 -3.20121e+00 5.10483e+01 0.00000e+00
AMORTISOR_PISTONU MATERIAL: METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 9.62789e-05 -5.12896e+01 7.17659e+01 0.00000e+00
SALINCAK MATERIAL: STEEL
7.82708e-09 2.37186e-04 8.19773e+01 1.23149e+00 0.00000e+00
SALINCAK MATERIAL: STEEL
7.82708e-09 2.37186e-04 8.18744e+01 -1.34286e+02 0.00000e+00
ROT MATERIAL: STEEL
7.82708e-09 7.09214e-05 6.69710e+01 -3.26821e+01 0.00000e+00
PORYA_GOBEGI MATERIAL: AL2014
2.79355e-09 6.88836e-04 1.71258e+02 -6.77901e+01 1.35402e+00
BILYALI_RULMAN MATERIAL: UNKNOWN
7.86000e-09 1.15233e-04 1.72717e+02 -6.79952e+01 1.18040e-02
PORYA MATERIAL: SS
7.74372e-09 8.73897e-04 2.10429e+02 -6.80527e+01 4.56915e-02
DISK MATERIAL: STEEL

7.82708e-09 3.41029e-04 2.05967e+02 -6.80459e+01 4.16815e-02
JANT MATERIAL: AL2014
2.79355e-09 7.53597e-03 2.64396e+02 -6.81351e+01 9.41844e-02
ISO14579-M5X25-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 5.80242e-06 2.59254e+02 -5.67889e+01 1.65651e+01
ISO14579-M5X25-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 5.80242e-06 2.59219e+02 -8.02926e+01 1.59641e+01
ISO14579-M5X25-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 5.80242e-06 2.59229e+02 -8.69842e+01 -6.57492e+00
ISO14579-M5X25-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 5.80242e-06 2.59270e+02 -6.76161e+01 -1.99039e+01
ISO14579-M5X25-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 5.80242e-06 2.59286e+02 -4.89544e+01 -5.60259e+00
ISO14579-M10X35-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 3.51816e-05 0.00000e+00 2.39999e+00 1.00000e+02
ISO7040-M10-5_ MATERIAL: 5
7.85000e-09 1.24707e-05 0.00000e+00 -1.62130e+01 1.00000e+02
ISO14579-M10X35-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 3.51816e-05 0.00000e+00 2.39999e+00 -1.00000e+02
ISO7040-M10-5_ MATERIAL: 5
7.85000e-09 1.24707e-05 0.00000e+00 -1.62130e+01 -1.00000e+02
ISO14579-M10X35-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 3.51816e-05 0.00000e+00 -1.27600e+02 1.00000e+02
ISO7040-M10-5_ MATERIAL: 5
7.85000e-09 1.24707e-05 0.00000e+00 -1.46213e+02 1.00000e+02
ISO14579-M10X35-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 3.51816e-05 0.00000e+00 -1.27600e+02 -1.00000e+02
ISO7040-M10-5_ MATERIAL: 5
7.85000e-09 1.24707e-05 0.00000e+00 -1.46213e+02 -1.00000e+02
ISO14579-M5X35-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 7.34376e-06 -2.12000e+02 3.12500e+01 1.81761e+00
ISO7040-M5-5_ MATERIAL: 5
7.85000e-09 1.71407e-06 -2.12000e+02 3.12500e+01 -1.67058e+01
ISO14579-M6X30-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 9.84042e-06 3.13609e+01 6.07627e+01 8.15246e-01
ISO7040-M6-5_ MATERIAL: 5
7.85000e-09 3.17959e-06 3.13609e+01 6.07627e+01 -1.31396e+01
ISO14579-M6X30-12_9_ MATERIAL: 12_9

7.85000e-09 9.84042e-06 -2.70609e+01 7.78741e+01 8.15246e-01
ISO7040-M6-5_ MATERIAL: 5
7.85000e-09 3.17959e-06 -2.70609e+01 7.78741e+01 -1.31396e+01
ISO14579-M5X35-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 7.34376e-06 -9.00000e+00 3.12500e+01 1.81761e+00
ISO7040-M5-5_ MATERIAL: 5
7.85000e-09 1.71407e-06 -9.00000e+00 3.12500e+01 -1.67058e+01
ISO14579-M6X25-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 8.73066e-06 1.02581e+02 -1.26127e+02 6.33322e-01
ISO7040-M6-5_ MATERIAL: 5
7.85000e-09 3.17959e-06 1.02581e+02 -1.26127e+02 -1.06396e+01
ISO14579-M3X25-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 1.85755e-06 1.59463e+02 5.44143e+00 0.00000e+00
DIN7980-3_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 1.30538e-07 1.58680e+02 1.38233e+01 -1.02804e-02
DINENISO7092-3_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 8.74623e-08 1.58809e+02 1.30566e+01 -8.04692e-04
ISO14579-M3X25-12_9_ MATERIAL: 12_9
7.85000e-09 1.85755e-06 1.59239e+02 -1.41391e+02 0.00000e+00
DIN7980-3_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 1.30538e-07 1.58556e+02 -1.49782e+02 -2.54557e-03
DINENISO7092-3_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 8.74623e-08 1.58562e+02 -1.49004e+02 -8.04692e-04
SALINCAK_KILIDI MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 6.34165e-05 1.63573e+02 1.89796e+01 3.46765e-03
SALINCAK_KILIDI MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 6.34165e-05 1.63307e+02 -1.54942e+02 3.46765e-03
ISO2338-3M6X18-ST_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 9.93173e-07 1.70894e+02 2.55077e+01 -3.79900e+01
ISO2338-3M6X18-ST_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON

7.86000e-09 9.93173e-07 1.70826e+02 2.55078e+01 3.80100e+01
ISO2338-3M6X18-ST_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 9.93173e-07 1.70540e+02 -1.61492e+02 3.80100e+01
ISO2338-3M6X18-ST_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 9.93173e-07 1.70609e+02 -1.61492e+02 -3.79900e+01
ISO14579-M5X16-10_9_ MATERIAL: 10_9
7.85000e-09 4.41521e-06 2.05517e+02 -3.51986e+01 -4.28202e+01
DIN7980-5_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 4.93872e-07 2.08106e+02 -3.52808e+01 -4.27532e+01
ISO7040-M5-8_ MATERIAL: 8
7.85000e-09 1.71407e-06 1.97100e+02 -3.51857e+01 -4.28277e+01
ISO14579-M5X16-10_9_ MATERIAL: 10_9
7.85000e-09 4.41521e-06 2.05490e+02 -1.71314e+01 1.80353e+01
DIN7980-5_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 4.93872e-07 2.08079e+02 -1.72136e+01 1.81023e+01
ISO7040-M5-8_ MATERIAL: 8
7.85000e-09 1.71407e-06 1.97073e+02 -1.71185e+01 1.80277e+01
ISO14579-M5X16-10_9_ MATERIAL: 10_9
7.85000e-09 4.41521e-06 2.05377e+02 -6.94252e+01 5.40235e+01
DIN7980-5_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 4.93872e-07 2.07966e+02 -6.95075e+01 5.40905e+01
ISO7040-M5-8_ MATERIAL: 8
7.85000e-09 1.71407e-06 1.96961e+02 -6.94124e+01 5.40160e+01
ISO14579-M5X16-10_9_ MATERIAL: 10_9
7.85000e-09 4.41521e-06 2.05335e+02 -1.19812e+02 1.54100e+01
DIN7980-5_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 4.93872e-07 2.07924e+02 -1.19894e+02 1.54769e+01
ISO7040-M5-8_ MATERIAL: 8
7.85000e-09 1.71407e-06 1.96919e+02 -1.19799e+02 1.54024e+01
ISO14579-M5X16-10_9_ MATERIAL: 10_9
7.85000e-09 4.41521e-06 2.05421e+02 -9.86586e+01 -4.44427e+01

DIN7980-5_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 4.93872e-07 2.08010e+02 -9.87408e+01 -4.43758e+01
ISO7040-M5-8_ MATERIAL: 8
7.85000e-09 1.71407e-06 1.97005e+02 -9.86457e+01 -4.44503e+01
MAFSAL MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 7.97677e-06 -9.30000e+01 -5.87500e+01 1.25325e+02
DIREKSIYON_ROTU_UZUN_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 9.30270e-05 -8.54493e+01 -5.89260e+01 1.28000e+02
KARDAN_KAPLINI_ MATERIAL: UNKNOWN
7.85914e-09 8.51166e-05 1.95834e+01 -6.11505e+01 1.26667e+02
DIREKSIYON_ROTU_KISA_ MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 6.53910e-05 9.94454e+01 -5.94545e+01 1.05379e+02
ISO14579-M10X35-10_9_ MATERIAL: 10_9
7.85000e-09 3.51816e-05 1.60655e+02 -5.68268e+01 8.80010e+01
ISO7040-M10-8_ MATERIAL: 8
7.85000e-09 1.37141e-05 1.61108e+02 -7.39134e+01 8.94865e+01
BILYALI_RULMAN MATERIAL: UNKNOWN
7.86000e-09 1.15233e-04 1.58717e+02 -6.79738e+01 -7.75983e-04
YAY MATERIAL:
METAL_STEEL_LOW_CARBON
7.86000e-09 2.17387e-04 -1.09804e+02 5.74480e+01 4.26384e-01
LASTIK MATERIAL: AL2014
2.79355e-09 4.60565e-03 2.69854e+02 -6.81434e+01 9.90881e-02



Bölüm 6

OTONOM ARAÇLARDA SİBER SALDIRI KAYGILARI VE BU KAYGILARI GİDERMEK ÜZERE ALINAN TEDBİRLER ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

M. Akif Kunt[1], Haluk Güneş[2]

1 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Tavşanlı, Kütahya, Türkiye
(ORCID: 0000-0001-5710-7253)
2 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Tavşanlı, Kütahya, Türkiye
(ORCID: 0000-0002-0915-0924)

GİRİŞ

Günden güne gelişen dijital teknolojiler otomobil dünyasına büyük yenilikler getirmiştir. Bu gelişmelerle birlikte yüksek maliyetli otonom araçların siber güvenlikleri ile ilgili kaygılar da artmıştır. Otonom araç sistemlerinde güvenliği tehdit eden saldırılar sistemin kontrolünü ele geçirme, sistemin çalışma yoğunluğunu artırarak sistem performansını azaltma yada çökmesini sağlamayı amaçlamaktadır. Yapılan saldırıların başarıya ulaşması durumunda araç kazalarının artması, kullanıcı yada yolcuların kişisel bilgilerin kötü amaçlı kullanımı ve kaza sayısına bağlı artan sigorta maliyetleri gibi pek çok önemli sorun ortaya çıkacaktır. Bu çalışmada otonom araçlara yönelik yapılabilecek siber saldırı türleri ve bu saldırılara karşı alınabilecek önlemler ele alınmıştır. Yapılan araştırma tamamen etik kurallara dikkat edilerek hazırlanmıştır.

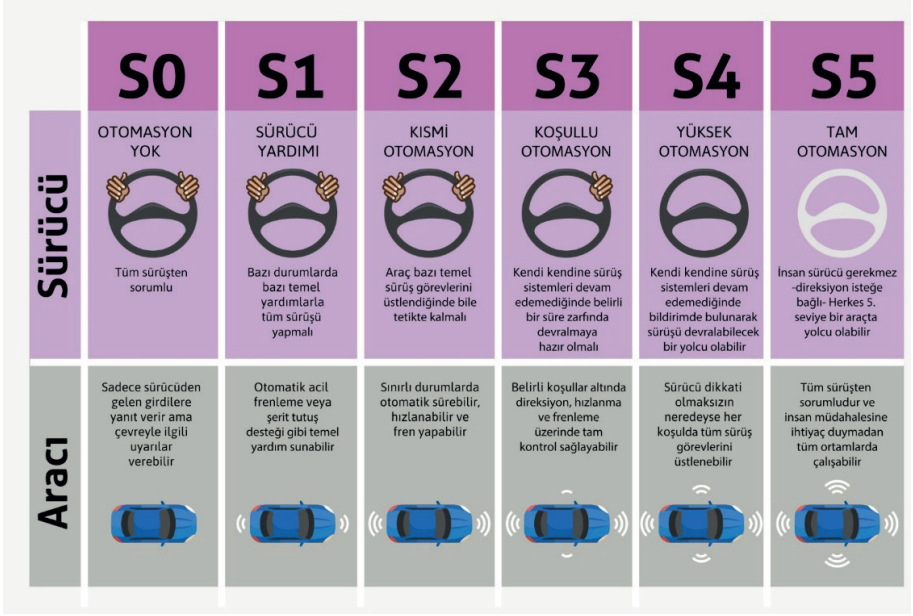
Otomobil teknolojilerindeki hızlı gelişmeler yakın bir gelecekte karayollarında otonom teknolojili otomobillerin kullanımını mümkün kılmaktadır. Teknolojideki hızlı gelişmeler otomotiv sektöründe taşıt performansı, konforunu geliştirirken özellikle otonom araç teknolojilerinde bazı güvenlik kaygılarını ortaya çıkarmıştır. Otonom otomobillerle ilgili gerek yasal düzenlemelerin yapılması gerekse araç içi ve çevredeki can ve mal güvenliği için kaygıların azaltılması bir zorunluluktur. Otonom araçlar ile konvansiyonel araçlar arasında sürücü kontrolünün kısmen yada tamamen kumanda ünitesi tarafından yapılabilmesi bakımından çok önemli bir fark bulunmaktadır. Otonom araçların bu işlemi yapabilmesi için kontrol üniteleri, kablosuz iletişim ağları, sensör grupları, trafik ve şehir karayolu altyapısı ve iklim durumu haberleşme imkanlarını kullanması gerekmektedir. Otonom araçların kullanımının yaygınlaşması trafikteki insan kaynaklı kazaların azaltılmasını sağlayacaktır. Kaza sayısının azaltılması ile kaza maliyetleri ve araç sigorta poliçe maliyetleri de azaltılacaktır. Otonom araçların kayda değer avantajlarının bulunmasının yanı sıra siber güvenlik kaygılarının azaltılması bu araçların yaygınlaşmasının önündeki en büyük problemlerden birisidir. Otonom sistemlerinin kullandıkları dijital sistemler ve iletişim protokolleri beraberinde siber saldırı riskini de getirmektedir. Otonom araçların birbirleriyle ve çevreyle sürekli iletişim içerisinde olmaları sırasında kullandıkları iletişim kanalları siber saldırılar için hedef noktalarıdır. Otonom araçlara yapılan siber saldırıların başarılı olması sistemin altyapısına ve irtibat halinde olduğu diğer otonom araçlara da zarar verebilir. Bu bakımdan otonom araçlara yapılabilecek saldırı türlerinin neler olduğunun bilinmesi, siber güvenlik önlemlerinin ve standartlarının tanımlanması hayati bir öneme sahiptir.

Otonom Araç Seviyeleri

6 temel otonom sürüş seviyesi bulunmaktadır Tamamen insan algısı, kontrolü ve planlaması ile hareket eden araçlar "Seviye 0" olarak tanımlan-

maktadır. Herhangi bir sürüş otomasyonu bulunmamaktadır. Araçta hız sabitleyici yada hız sınırlayıcı gibi bir yardımcı sistemin bulunması durumunda bu araçlar "Seviye 1" olarak adlandırılmaktadır. Bu seviyede direksiyon hareketleri yine sürücü tarafından kontrol edilmektedir. Şerit kontrol sistemi ve uyarı sistemleri bulunan araçlar "Seviye 2" olarak tanımlanmıştır. Bu seviyede yatay araç kontrolüne destek te verilmektedir. "Seviye 3"'te sistem belli bir noktaya kadar nesne ve olay algılama kabiliyetine sahiptir. Bir problem olduğunda ise sürücünün kontrolü alması gerekmektedir. Bu seviyede yasal sorumluluğun sürücüde mi yoksa otonom araç ta mı olduğu halen tartışmalıdır. Dünya üzerinde genel olarak sürücünün kusurlu olduğunu kanıksayan bir durum var iken son dönemlerde yasal sorumluluğu kabul eden otonom araç şirketleri de ortaya çıkmaktadır. Acil durumların üstesinde gelebilme yada sürücülerin gerekliyse aracı devralmalarını isteyen sistemler "Seviye 4" grubudur. Bu seviyede yolcular film izleme yada telefona bakma gibi faaliyetlerini rahatça gerçekleştirebilmektedir. "Seviye 5'in henüz bir örneği bulunmamaktadır. Araçların tam otomasyonlu olduğu, sürücülerin sürücü koltuklarında oturmadığı ideal bir noktayı ifade etmektedir.

Şekil-1. *Otonom araç seviyeleri (İnternet, 2023)*



Otonom Araçlarda Siber Saldırı Türleri

Otonom araçlarda merkezi kontrol ünitesinin bağlı olduğu, veri alışverişi yaptığı kablolu ve kablosuz bağlantılar siber saldırı yapılma ihtimali bulunan noktalardır. Bu saldırılar kullanıcıya yönelik yada sisteme yönelik olmaktadır. Kullanıcıya zarar verme, tehdit etme gibi fiiller aracın kontrolünün kötü niyetli kişilerin eline geçmesi durumunda yapılabilmektedir. Aracın harita

kontrolünün ele geçirilmesi aracın farklı bir rotaya yönlendirilmesi veya bulunduğu yerde sabit bırakılmasına neden olabilir. Otonom bir araca yapılacak siber saldırı için sistem kusurlarının izlenmesi gerekmektedir. Bu eksikliklerin sınanması için sisteme payloadlar gönderilmektdir. Gönderilen payload saldırı kodları zararlı kodlar olup sistemin izin gerektirmeden izlenmesi ve diğer makinelerle paylaşılmasına imkan sağlamaktadır (Han et al;2014, Sheehan et al.,2019). Otonom araçlarda yapılabilecek bazı saldırı türlerinin genel özellikleri aşağıda verilmiştir.

Exploit (İstismar) Yöntemi

Exploit yöntemi yazılımlarda, bilgisayarlarda yer alan açıklardan, kod hatalarından faydalanmak amacıyla geliştirilmiş kod ve program gruplarıdır. Bu yöntemde sisteme dış ortamdan kodlar gönderilmekte ve sistem normal çalıştığına ikna edilmektedir. Yetkisiz erişim için kullanılan metot açık kaynaklı kodlardır. Bu yöntem güvenlik açıklarının ne boyutta olduğunun görülmesi bakımından da kullanılabilmektedir. Bir araç sistemini ele geçirmek için önce savunmasız noktalar tespit edilmelidir. Bu tespitten sonra siber saldırıyı yapmak için "exploit" adı verilen program scriptlerine ihtiyaç vardır. Exploitler hedef otonom araç sisteminin savunmasız olarak tespit edilen yapıları sömürerek sisteme sızma gerçekleştirmektedir. Bu nedenle otonom araç üreticileri sistemlerinin güvenlik açıklarını sürekli araştırarak güvenlik açıklarını gidermelidir. Exploitler Local ve Remote olmak üzere temelde ikiye ayrılmaktadır. Sistemin içinden yapılan saldırılar daha etkili olmakla birlikte Local exploit olarak isimlendirilmektedir. Remote exploitler ise dış bir bilgisayardan uzaktaki bir sunucuya yapılan saldırılardır.

Bellek Taşması (Buffer Over Flow)

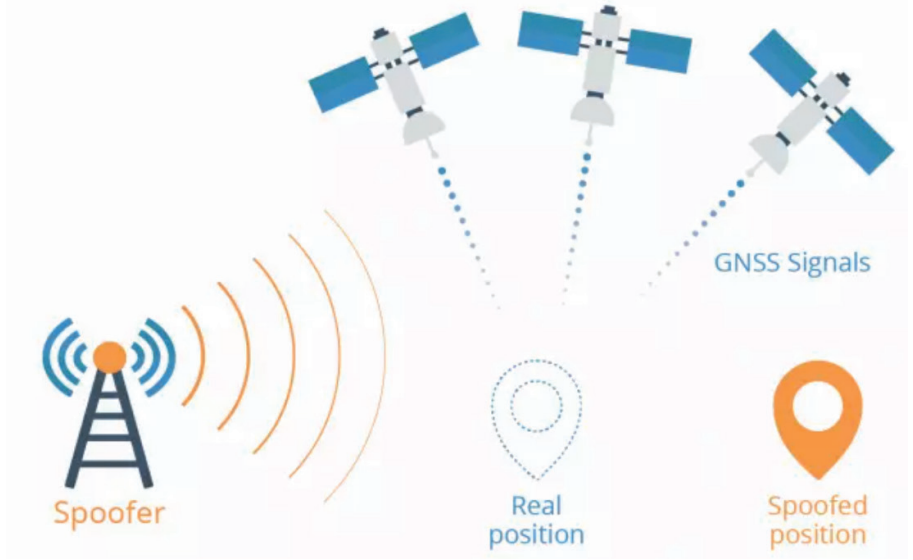
İki yazılım arasında, ayrılmış olan bellek miktarına daha fazla veri yüklenmesi yapılarak ortaya çıkan bir durum olarak açıklanabilir. Siber saldırganlar fazla veri yüklenmesi durumunu bir zafiyet olarak kullanarak sistemlere zararlı kodlar yükleyerek çalıştırabilirler. Siber saldırılar C programlama dilinde yazılan değişkenler (Buffer) yardımıyla yapılmaktadır. Ekstra veri kötü amaçlı bir programlama ise ayrılan belleğe yüklenmektedir. Bu durumda işletim sisteminin hata vermesi veya çökmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca bu yöntemle araya kodlar eklenerek sisteme yetkili bir kullanıcı olarak girilebilmektedir. Bu durum otonom araç güvenliği için çok önemli bir sorundur.

GPS Yanıltma (GPS Spoofing)

Radyo parazit dalgalarının zayıf GNSS sinyallerine baskın çıkarak uydu sinyali kaybına ve konumlandırma kaybına neden olmaktadır. Yanıltma işlemi otonom aracı yanlış bir konumda olduğuna inandırabilmektedir. Yüksek maliyetli ve donanım gerektiren bir saldırı türüdür (Jadoon et al., 2018, Parkinson et al., 2017). GPS yanıltma, Global Positioning System (GPS) sin-

yallerini yanıltarak veya manipüle ederek, bir konumun gerçekte olduğundan farklı bir konumda olduğunu göstermeyi amaçlayan bir siber güvenlik saldırı türü olarak ta tanımlanmaktadır. Bu tür saldırılar, GPS sinyallerini benzeterek veya önemli ölçüde değiştirerek hedeflenen bir otonom sistemin konumunu yanıltmaya çalışmaktadır. Bu tür bir saldırıdan korunmak için doğrulama ve şifreleme, çoklu sensör kullanımı, Jamming algılama, anten ve alıcıların fiziksel korunması, gelişmiş güvenlik protokolleri ve teknoloji kullanımı, düzenli yazılım güncellemelerinin yapılması gerekmektedir. GPS yanıltma saldırıları, bir dizi potansiyel zarara yol açabilir ve çeşitli amaçlar için kullanılabilir.

Şekil-2. *GPS Spoofing (İnternet, 2022)*

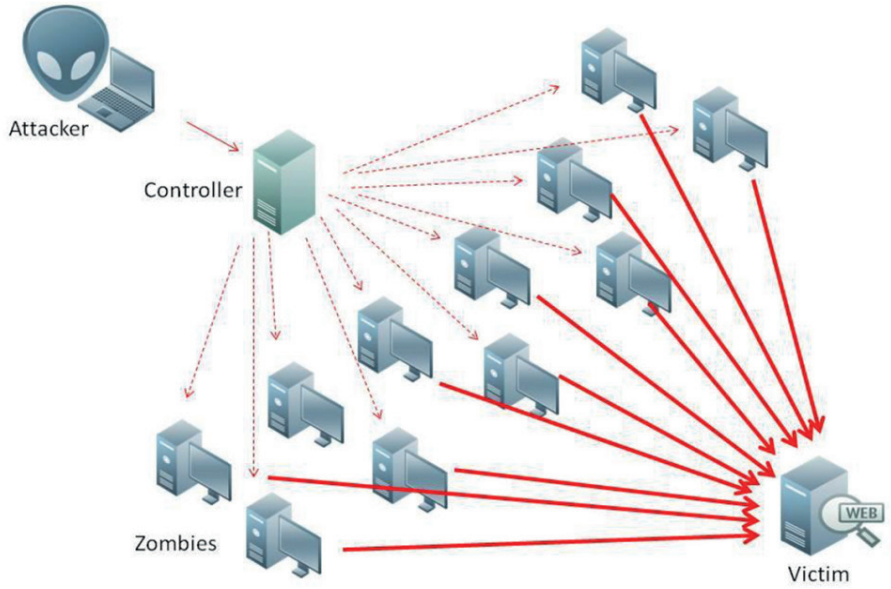


Bu saldırısı sırasında, aracın yakınlarında bulunan bir radyo vericisi, hedef araca sahte GPS sinyalleri göndererek akıllı aracı farklı bir coğrafi bölgede olduğuna inandırabilmektedir. Uydular tarafından yayılan sinyaller yeryüzüne çarptığında zayıflamaktadır. Bu durumda GPS alıcısının yakınlarına güçlü bir radyo vericisi yerleştirilip GPS sinyalleri yayınlandığında GPS alıcılarının yanlış koordinat hesaplaması mümkün olmaktadır. GPS yanıltma tehditlerine karşı çoklu antene sahip alıcı yapılandırılması ve hüzmeleme (beamforming) teknolojisi kullanılabilmektedir. Bu teknik sinyal gürültüsü ve parazitini önlemekle birlikte sinyalin geldiği yönü de belirlemektedir. Sinyal yönünün bilinmesi gerçek ve sahte GPS bilgilerinin ayrıştırılmasını kolaylaştırmaktadır. Bu yöntemin dışında günümüz koşullarında halen pahalı bir çözüm olan GPS güvenlik duvarı oluşturma yöntemi de kullanılabilir. GPS alıcısı ile uydu arasına yerleştirilen bir ara cihaz sürekli olarak sinyalleri eşleştirmektedir. Bu sayede alıcıya sadece gerçek sinyaller ulaşmaktadır.

Hizmet Kesintisi Saldırısı (DDos-DoS Attack)

Bu saldırı tipi sunuculara yönelik anlık ve çok ciddi miktarlarda aşırı yoğunluk oluşturularak kaynak tüketiminin maksimum seviyeye çıkarılması hedeflenen bir saldırı türüdür. Siber saldırganın büyük miktarlarda birbirine benzemeyen IP adresleri kullanarak saniyede terabit boyutlarında verileri göndermesiyle yapay bir veri trafikleri oluşturulmaktadır. Bu saldırının başarılı olması durumunda otonom araç sistemlerinin hizmet verememesi gibi durumlar yaşanabilmektedir. Bu saldırılarda "Spoof" yöntemi kullanıldığında saldırıyı yapan kişilerinin bulunamaması mümkün olmayabilir. Bazı "DoS" siber saldırı türleri şunlardır.

Şekil-3. *Hizmet kesintisi saldırısı (İnternet, 2022)*



Hacim Odaklı DDoS Saldırıları

Volume Based DoS ismiyle isimlendirilen siber saldırı türünde otonom araçların kullandığı bant genişlikleri hedeflenmektedir. Tüm sistem sunucuları bir bant genişliğine sahiptir ve bant genişlik kapasitesi sınanabilir. Bant genişlik potansiyelinin üzerinde sorgu/veri paketinin gönderilmesi durumunda bant genişliği tümüyle meşgul edilerek sunucunun cevap vermesi önlenmektedir. Bu saldırı türü hedef otonom sistem veya ağa büyük miktarda bir veri trafiği göndererek sistemin kaynaklarını tüketmektir. Hacim odaklı DDoS saldırılarından korunmak için trafik filtreleme, güvenlik duvarları, saldırı trafiklerini algılamak, özel filtreleme ekipmanları, içerik dağıtım ağları (CDN) kullanımı ve bulut tabanlı güvenlik hizmetleri kullanımı gerekmektedir.

Protokol Bazlı DDoS Saldırılar

Bu saldırı biçimi Open Systems Inter Connection (OSIC) olarak adlandırılan ve OSI katmanları hedef alınarak yapılan saldırılardır. Protokol bazlı saldırı modelinde otonom araçların kullandıkları sistemlere ait 3. ve 4. Seviyedeki katman protokollerinde bulunan güvenlik eksiklikleri kullanılmaktadır. Tehlike seviyesinin yüksek olduğu kadar etki seviyesi de yüksek olan bir siber saldırı çeşididir. Sistem protokollerinin yıllarca kullanılması ve güncelleme eksiklikleri bu siber saldırı türünü etkili ve güncel tutmaktadır.

Uygulama Katmanlı DDoS Saldırıları

Application Layer DDoS olarak tanımlanan siber saldırılarda veri gruplarındaki (paketlerindeki) GET ve POST' lar kullanılmaktadır. Hedeflenen otonom araç sistemine kapasite üzeri yüklemelerle GET ve POST istekleri oluşturularak sistem kaynaklarının tüketilerek sunucunun cevap veremeyecek bir duruma getirilmektedir.

SYN Flood DDoS Saldırıları

Bu siber saldırı türü sunucuları hedef almaktadır. SYN paketleri kullanılarak yapılan bu siber saldırılarda kaynaklar tamamen tüketilerek sunucunun kilitlenmesi amaçlanmaktadır. Eş zamanlı pek çok SYN paketi erişim amaçlı olarak farklı noktalardan gönderilirse SYN Flood meydana gelmektedir. Sistemde çok fazla miktarda SYN paketi yer almasından dolayı sistem cevap veremez duruma gelmektedir. Bu istekler çoğunlukla gerçek bağlantı isteği taşımamaktadır. Hedeflenen otonom sistem aşırı SYN talebine cevap vermeye çalışırken gerçek bağlantılar için tanımlanmış bağlantı noktaları dolar. Bu durumda hedef sistemin kaynakları tüketilmiş olur, sistem gücü düşer ve hizmet kesintileri meydana gelmeye başlar. Bu tür saldırılardan korunmak için SYN paketlerini filtreleyebilen cihazların kullanımı, IP adreslerinden gelen bağlantı taleplerini sınırlayan sınırlayıcı kullanımı, SYN-Cookie kullanımı, SYN paketlerini inceleyerek saldırı trafiğini denetleyen yük dengeleyici kullanımı ve izleme-algılama sistemleri kullanımı tercih edilebilir.

UDP Flood DDoS Saldırıları

Sistemin UDP protokolünü hedefleyen bir DDOS siber saldırı biçimidir. Diğer siber saldırı türlerinde olduğu gibi otomobil sunucusuna yoğun bir biçimde UDP paketleri gönderilmesi suretiyle UDP Port' larının kullanılamaz bir duruma getirilmesi ve sunucunun yanıt veremeyecek duruma getirilmesi amaçlanmaktadır. UDP protokolleri 3'lü el sıkışma (3-way handshake) özelliğine sahip değildir. Paket gönderilmesinden sonra port kontrolü yapılmaktadır. Port kullanıcısının olmaması durumunda ICMP (hedefe ulaşılamıyor) paket geri dönmektedir. Bu tür saldırılar aracın yol bilgisi bilgilerini alamamasına ve aracın harekete geçmemesine sebep olmaktadır.

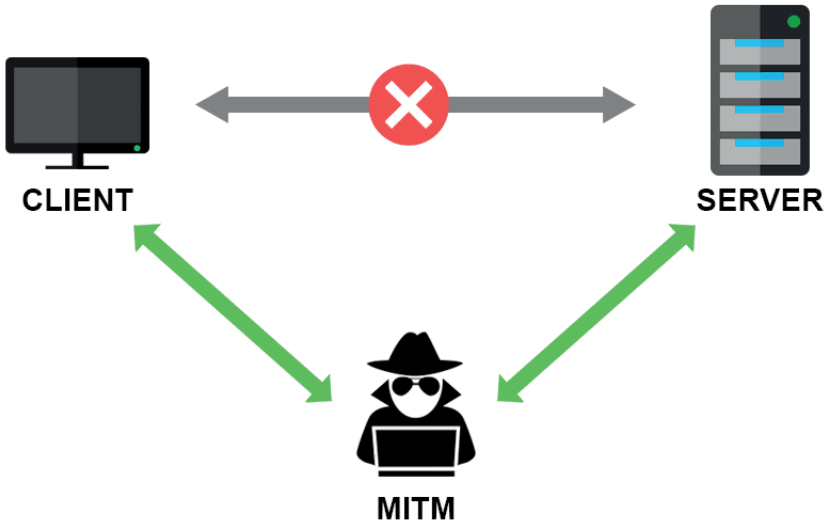
PING Flood DDoS Saldırıları

PING tipi siber saldırılarda PING paketleri kullanılması ve yoğun bir biçimde tekrarlanması ile sunucunun kaynaklarının tüketilmesi hedeflenmektedir. Yoğun olarak gönderilen PING paketlerine sunucunun yanıt vermesi sırasında CPU ve RAM kullanımı tümüyle tüketilerek kilitlenmesi ve yanıt veremeyecek duruma getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemde siber saldırgan botnet veya zombi ağı kullanarak sanal bir saldırı grubunu otonom sisteme ICMP Echo Request paketi göndermek için kullanır. Bu paketler hedef otonom sistemden cevap almayı beklerler. Diğer saldırı türlerinde olduğu gibi sistemin normal trafiği ve hizmetleri kaynaklarının tüketilmesi sebebiyle kesintiye uğrar. Bu saldırılardan korunmak için ICMP trafiğini kontrol etmek için güvenlik filtreleme duvarları, ICMP tepki sınırlamaları, ICMP trafiğini izleyen ve anormal tepkileri bloke eden yük dengeleyici sistemleri kullanılabilir.

Ortadaki Adam Saldırısı (Man in the Middle)

Bu saldırı türünde ağ cihazları ile hedef sistem bilgisayarları arasında yetkisiz bir erişim oluşturularak gizli veri elde etme ve şifrelenmemiş verileri takip etme amaçlanmaktadır (Efe & Kalkancı & Donk & Cihangir & Uysal, 2019).

Şekil-4. *Ortadaki Adam Saldırısı (İnternet, 2022)*



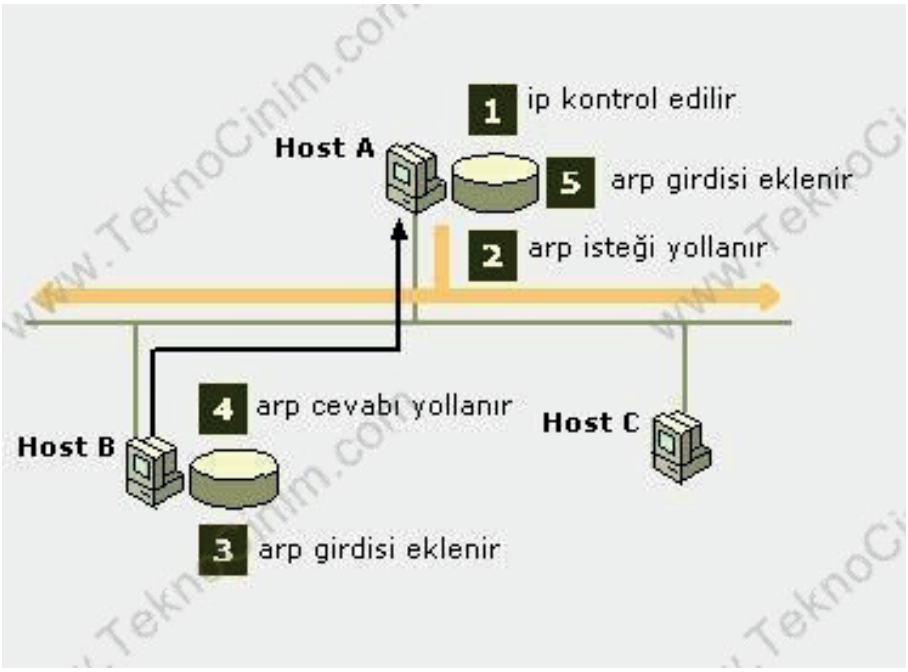
Ortadaki Adam Saldırısı, kötü niyetli hackerlar tarafından gerçekleşen saldırı biçimi olup etkinlik seviyesi yüksek saldırı türüdür. Bu saldırı biçiminin iki temel amacı bulunmaktadır. Saldırıların ilk temel amacı kullanıcıların yada sistemin hassas ve kişisel bilgilerine erişimin sağlanması, ikinci amacı

ise iletilen mesajların içeriğinin işlenerek düzenlenmesidir. Saldırıyı uygulayarak başarılı olan saldırgan; hedef sistemi kullanan kişi yada kişilerin kimlik bilgilerini elde ederek banka hesaplarına yetkisiz erişim sağlayabilmekte, her türlü banka bilgilerini çalabilmekte, hedef sistem kullanıcısını kötü amaçlı web sitelerine yönlendirme imkanına sahip olabilmektedir (Tungal, 2021). Sistemi kullanan kişi rahatlıkla izlenebilmekte ve manipüle edilebilmektedir (Özarpa & Avcı & Kara, 2021). Sunucunun kullanıcıya göndereceği her paket siber saldırganın terminalinden geçmektedir (Altınkaynak, 2020)

ARP Spoofing (Yanıltma)

ARP (Address Resolution Protocol), IP akışını verimli bir şekilde yönlendirmek için kullanılmaktadır. Bu saldırı türünde saldırgan Ethernet vasıtasıyla kullanıcılara ARP paketleri gönderilmektedir. Gönderilen paketlere cevap veren kullanıcı yada sunucu aynı zamanda güvenlik zafiyeti olan kullanıcıdır (Forshaw, 2018; Şimşek, 2020). Bu sistem aslında herhangi bir ağda bulunan IP adreslerini fiziksel MAC adreslerine dönüştürüen bir tür protokoldür. Eğer ARP tablosuna yanıltıcı bilgilerle bir saldırı düzenlenirse bu durum ağ güvenliği bakımından bir tehdit oluşturacaktır. Bu saldırılarda hedef cihazdan ARP isteği alınarak hedefe sahte bir ARP yanıtı gönderilmektedir. Gönderilen sahte ARP yanıtı hedef aracın ARP tablosunda bir güncelleme yaparak sahte bir IP-MAC çifti kaydı gerçekleştirir. Bu noktadan sonra hedeflenen cihaz ağ akış trafiğini siber saldırı bilgisayarına yönlendirir. Bu şekildeki saldırılarla veri izleme, veri çalma, hedef-hedef arasındaki iletişimi engelleme veya hizmet kesintisi sağlanabilir. Bu tür saldırılardan korunmak için ARP tablo izleme ve temizleme programları kullanılabilir. ARP koruma switcleri kullanımı, kullanıcılara güvenlik eğitimlerinin verilmesi, VLAN (Virtual Local Area Network) kullanımı, ARP Spoofing karşıtı teknoloji kullanımı, statik ARP girişlerinin kullanımı diğer korunma metotlarıdır.

Şekil-5. *ARP Spoofing (İnternet, 2023)*



Otonom Araçlarda Siber Saldırılara Karşı Alınacak Önlemler

Otonom araçlarda siber saldırı türleri ne kadar çok olsa da önleme teknikleri de o ölçüde fazla sayıdadır. Bu bakımdan otonom otomobiller için hazırlanmış tespit araçlarının ve dış koruyucu sistemlerin varlığı önemlidir. Otonom araç sistemlerinde yüklü olan denetleme araçlarının koruyuculuğu güvenlik kaygılarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Otonom sistemlere sızmış zararlı yazılımların yapılan taramalarda tespit edilmesi ve zararlı yazılımların silinmesi gerekmektedir. Metasploit database aracılığı ile otonom araçların açıklıkları denetlenebilmektedir. Yapılan siber saldırı fiziksel bağlantı gerektirmiyorsa IP bağlantı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. IP hareketlerinin denetlenmesi siber saldırganın kimliğini verebilir. Siber saldırı tespit araçları olarak NMAP, Maltego ve Metasploit kullanılabilmektedir. NMAP denetimi ile dışarıdan gelen bağlantılar ile adreslerin taranması sonucunda IP kullanılarak tespit edilen bağlantılar kontrol edilmektedir. Maltegosistemin sahip olduğu aktif ve pasif bilgileri sunmaktadır. Java programlama dilinde geliştirilmiş olup açık kaynak bilgileri ni toplamak ve bu bilgileri analiz etmek amacıyla da kullanılmaktadır (Andres, 2011). Metasploit ise açık kaynak kodlu bir yapıya sahiptir. Kendisine ait bir veri tabanına sahip olup veri, Lib, Eklentiler, Araçlar, Harici kaynaklar ve dökümantasyon içeren bir dosyalama sistemine sahiptir (Altınkaynak, 2020).

Şekil-6. *Otonom araçlarda siber güvenlik önlemleri (İnternet, 2023)*



SONUÇ

Günden güne hayatımıza daha çok girmekte olan otonom sistemlerin teknolojik gelişmelerine paralel olarak güvenlik ve hukuksal kaygıları da karşılamalıdır. Bu bakımdan güvenlik yatırımları çok büyük önem arz etmektedir. Otonom araç üreticilerinin güvenlik uzmanlarının çalışmaları sistem işlemcisinin sisteme olan katkılarını azaltmaya yönelik olmalıdır. Bu ihtimalin gerçekleşmesi siber saldırı başarısını azaltacaktır. Aynı zamanda işlemcinin yazılımına bağlı risklerde azalacaktır. Siber saldırı metotlarının değişmesi sebebiyle savunma stratejileri ve yöntemlerinin de güncellenmesi önemlidir. Savunma metotları arasında en önemlilerinden birisi çok katmanlı savunma sistemidir. Savunma sistemi yatırımlarının artırılarak otonom araç sistem güvenliğinin artırılması son derece önem arz eden bir konudur. Otonom araçlara yapılacak siber saldırıların başarılı olması hem toplum güvenliğini hem de bu teknolojilere olan güveni azaltacaktır. Siber saldırılara karşı dirençli alt yapıların oluşturulması, güncellenmesi, gerekli endüstriyel standartların geliştirilmesi ve caydırıcı kanuni ceza yaptırımlarının tanımlanması oldukça önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA

Altınkaynak, M. (2020). *Siber Güvenlik ve Hacking*. Abaküs Yayınları. Forshaw, J. (2018). *Attacking Network Protocols*.

Altınkaynak, M. (2020). *Siber Güvenlik ve Hacking*. Abaküs Yayınları.

Andress, J., & Winterfeld, S. (2011). Cyber Warfare Techniques, tactics, and tools. In *Cyber Warfare*. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-416672-1.00001-5.

Efe, A., Kalkancı, G., Donk, M., Cihangir, S., & Uysal, Z. (2019). A Hidden Hazard: Man-in-The-Middle Attack in Netwoks. *Anatolian Journal of Computer Science*, 96-116.

Han, K., Weimerskirch, A., & Shin, K. (2014). Automotive Cybersecurity for In-Vehicle Communication. *IQT Quarterly*, *6*(1), 22–25. https://kabru.eecs.umich.edu/papers/publications/2014/IQT Quarterly_Summer 2014_Han et al.pdf.

Jadoon, A. K., Wang, L., Li, T., & Zia, M. A. (2018). Lightweight Cryptographic Techniques for Automotive Cybersecurity. *Wireless Communications and Mobile Computing*, *2018*. https://doi.org/10.1155/2018/1640167.

İnternet, (2022). *Otonom araçlar sektörün dönüştürücü kartı olacak*. https://sigortacigazetesi.com.tr/otonom-araclar-sektorun-donusturucu-karti-olacak/.

İnternet, (2022). What Is GPS Spoofing & How To Ensure GPS Security? https://www.idstrong.com/sentinel/what-is-gps-spoofing--how-to-ensure-gps-security/

İnternet, (2022). Server Error: Distributed Denial-of-Service (DDoS) Attacks Explained https://www.pcmag.com/how-to/what-is-ddos-attack-distributed-denial-of-service

İnternet, (2022). Ortadaki Adam (MITM) Saldırısı Nedir? https://www.ozztech.net/siber-guvenlik/ortadaki-adam-mitm-saldirisi-nedir/

İnternet, (2023). *ARP Zehirlenmesi Nedir?,* https://www.turkhackteam.org/konular/arp-zehirlenmesi-nedir.1934122/

İnternet, (2023). How Can Autonomous Vehicles Be Protected Against Cyber Security Threats? http://www.innovationatwork.ieee.org/how-can-autonomous-vehicles-be-protected-against-cyber-security-threats/

Özarpa C., Avcı İ, Kara SA. Otonom Araçlar İçin Siber Güvenlik Risklerinin Araştırılması ve Savunma Metotları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Sayı 31 (Ek Sayı 1), S. 242-255, Aralık 2021*.

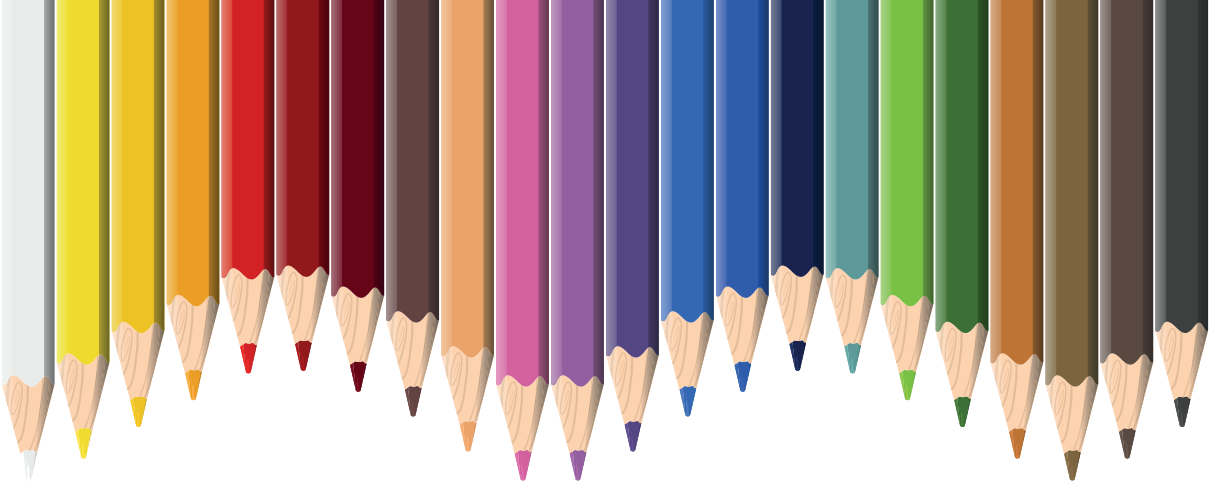
Parkinson, S., Ward, P., Wilson, K., & Miller, J. (2017). Cyber Threats Facing Autonomous and Connected Vehicles: Future Challenges. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *18*(11), 2898–2915. https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2665968.

Sheehan, B., Murphy, F., Mullins, M., & Ryan, C. (2019). Connected and autonomous vehicles: A cyber-risk classification framework. *Transportation Research Part A:*

Policy and Practice, *124*(November 2018), 523–536. https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.06.033.

Şimşek, H. F. (2020). *ARP Spoofing*. https://includekarabuk.com/kategoriler/cesitliSizmaTeknikleri/Arp-Spoofing-Saldirisi-Nedir-ve-Nasil-Yapilir.php.

Tungal, A. T. (2021, 10 13). *What Is a Man-in-the-Middle Attack and How Can It Be Prevented*. 05 01, 2022 tarihinde Upguard: https://www.upguard.com/blog/man-in-the-middle-attack#toc-1.



Bölüm 7

BİYOGAZ ÜRETİMİ İLE ENTEGRE ENERJİ SANTRALİ TASARIM VE İŞLETME PARAMETRELERİNİN İRDELENMESİ

Halit ARAT[1]

Oğuzhan ERBAŞ[2]

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, halit.arat@dpu.edu.tr, Orcid: 0000-0002-6634-2535,

2 Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, oguzhan.erbas@dpu.edu.tr, Orcid: 0000-0001-9424-4273,

GİRİŞ

Günümüzde fosil yakıtların neden olduğu iklim değişikliği ve beraberinde getirdiği çevre sorunları, ülkelerin uyguladıkları kırsal kalkınma politikaları, ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Küresel ısınmanın düzeyini ve karbon ayak izini azaltmak için fosil kökenli kaynakların kullanımı sınırlandırılarak çevreci ve yüksek verimli alternatif sistemlerin kullanılması teşvik edilmelidir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyoyakıtlar dünya atmosferindeki karbondioksitte net bir artışa neden olmadığı için ön plana çıkmaktadır (Working Group II Technical Support Unit, 2022). Biyoyakıtın kullanılması biyolojik olarak parçalanabilen atıkların değerlendirilmesini sağlamakta ve ülkelerin enerji çeşitliliğini arttırmaktadır. Ayrıca, sindirilmiş biyolojik gübrenin kullanılmasıyla önemli miktarda suni gübre ve sulama suyundan tasarruf edilebilmektedir (Szabó vd., 2014).

Organik atık maddelerin yok edilmesi için çoğunlukla şehirlerde gömme veya yakma işlemi uygulanmaktadır. Ancak bu proseslerde kimyasal kirleticiler yok edilmemekte, üstelik bu kirleticilerin yer altı sularına, toprağa ve havaya karışarak ekosistem üzerinde olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Bununla birlikte, atık depolama sahalarında atıkların anaerobik mikroorganizmalar tarafından iyi bir şekilde sindirilmemesi durumunda büyük miktarlarda metan ve karbondioksit gazının atmosfere karışarak iklim değişikliğine sebep olabilmektedir. Organik atık maddelerin uzaklaştırılması ve aynı zamanda ihtiyaç duyulan enerjinin sağlanmasında en etkili proseslerden biri anaerobik çürütmedir (Taleghani ve Kia, 2005). Anaerobik çürütme, organik maddelerin oksijensiz bir ortamda mikroorganizmalar tarafından parçalanması işlemi olup endüstriyel ve şehir atık suları, tarım, konut, gıda endüstrisi atıkları ve bitki artıkları da dahil olmak üzere çok çeşitli hammaddelere uygulanabilmektedir (Ward vd., 2008).

İçerik olarak başlıca metan ve karbondioksitten oluşan biyogaz, biyokütleyi biyogaza dönüştüren anaerobik bir reaktörde üretilir. Elde edilen biyogazın bir yakıcıda yakılmasıyla ihtiyaç duyulan elektrik ve ısı enerjisi üretilerek kullanıma sunulmaktadır. Bir enerji kaynağı çeşidi olmasının yanı sıra biyogazdan enerji üretimi, sosyo-ekonomik kalkınmayı olumlu yönde etkileyebilecek ve belirli bir bölgenin çevresini iyileştirebilecek büyük bir potansiyele sahiptir. Biyogazın az gelişmiş ve gelişmekte olan bölge ve ülkelerin kalkınması için bir fırsat olarak değerlendirilmektedir. Biyogazın bir diğer avantajı da kaynak olarak yaşamın her köşesinde bulunan atıklar olduğundan biyogaz bölgenin kendi iç kaynağıdır ve bu nedenle hemen hemen her yerde, özellikle kentsel alanlarda üretilebilmektedir (Szymańska ve Lewandowska, 2015).

Son yıllarda, gelişmekte olan ülkeler de enerji kaynaklarını çeşitlendirmekte ve bu çeşitlilikte yenilenebilir enerji kaynaklarının ağırlığını arttırmaktadırlar. Düşük karbon emisyonu ve özellikle çevreye zararlı atıkların

geri kazanılmasını sağlayan biyokütle ve biyogaz üretim sistemlerinin kullanımının her geçen gün artması beklenmektedir. Bu çalışmada biyogazın üretim süreçleri detaylı bir şekilde ele alınarak kullanım yöntemleri incelenmiştir. Bununla birlikte, mevcut kullanım durumları ortaya koyularak gelecekte hedeflenen yararlanma oranları yönelik çalışmalar irdelenmiştir.

BİYOGAZ: ÜRETİLMESİ VE KULLANILMASI

Biyogaz Üretimi

Organik atıklardan yanıcı biyogaz (metan gazı) üretim teknikleri temel olarak piroliz, gazlaştırma, alkollü fermantasyon ve anaerobik çürütmedir. Tablo- 1'de verildiği gibi biyogazın %40-70'i CH_4 ve %30-50'si CO_2 olup geri kalanı H_2S, N_2, H_2 ve eser miktarda O_2 ve CO'dur.

Tablo-1. Biyogaz bileşenleri ve bileşenlerin yüzdece oranları (TÜBA, 2022)

Bileşen	**Yüzdesi (%)**
Metan (CH_4)	40-70
Karbondioksit (CO_2)	30-50
Hidrojen sülfür (H_2S)	0-3
Azot (N_2)	0-2
Hidrojen (H_2)	0-1
Oksijen (O_2)	Eser Miktarda
Karbon monoksit (CO)	Eser Miktarda

Fosil kökenli yakıt kullanımının azaltılmasına yönelik ve yenilenebilir enerjiye artan ilgi nedeniyle biyokütle pirolizi uzun bir geçmişe ve önemli bir gelecek potansiyeline sahiptir. Piroliz, bir dizi katı (kömür), sıvı (biyo-yağ) ve gaz ürün elde etmek için organik matrisin oksijen yokluğunda doğrudan termal ayrışması olarak tanımlanabilir. Biyokütle hammaddeleri kullanılarak gerçekleştirilen piroliz; çok çeşitli yakıtlar, solventler, kimyasallar ve diğer ürünleri üretmek için ticari olarak kullanılmaktadır. Enerji vektörleri olarak sıvılar, gaz ve katılardan daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları ve depolama, taşıma, uyarlanabilirlik ve yenileme konularında fayda sağlamaları nedeniyle bu sıvıların türbinler, dizel motorlar ve kazanlar gibi halihazırda mevcut makinelerde potansiyel olarak uygulanması da yaygındır. Öte yandan, günümüzde ağırlıklı olarak piroliz yüksek verimli yağ üretimine odaklanmıştır (Vamvuka, 2011).

Gazlaştırma, lignoselülozik malzemelerden sentetik gaz oluşturmak için kullanılan termokimyasal bir işlemdir. Yaklaşık 1173K (veya daha yüksek) sıcaklıklarda, gazlaştırma, stokiyometrik olarak yanma için gerekli olan miktarlardan daha az miktarda oksijen veya havanın varlığında gerçekleştirilirken bu biyokütle gazlaştırma işleminde başlıca ana ürünler sentetik gazlar (H_2, CO, CO_2, CH_4 ve daha küçük miktarlardaki diğer gaz bileşiklerinden

oluşur), odun kömürü (tamamlanmamış karbon dönüşümünden kaynaklanan katı karbonlu bir malzeme) ve katran olarak gerçekleşmektedir (Pelaez-Samaniego vd., 2020). Gazlaştırma işleminde dönüşüm oranı yüksek olup biyogaz, hem sentez gazından hem de kalan külden üretilebilmektedir. Ayrıca hammadde bileşimi, basınç, gazlaştırma maddesi ve sentez gazı gibi faktörler dikkate alındığında sentez gazı üretimi ekonomik açıdan verimli bir proses olarak tanımlanabilir (Patinvoh vd., 2017).

Alkolik fermantasyon başta fruktoz ve glikoz olmak üzere şekerlerin (heksozlar) karbondioksit ve etanole anaerobik dönüşümü olarak tanımlanmaktadır. Alkolik fermantasyon işlemi sırasında fermantasyon sıvısı doygunluğa ulaştığında CO_2 yayılmakta ancak üretilen etanolün bir kısmı fermantasyon sırasında buharlaşsa da büyük bir kısmı çözünmektedir. Ancak alkolün fermente edilmesi süreci eş zamanlı birçok biyolojik, kimyasal ve fiziksel reaksiyonu içermektedir (Meng vd., 2020; Sofokleous vd., 2022).

Biyogaz çoğunlukla anaerobik koşullar altında bir sindirim sürecinden üretilmektedir. Anaerobik çürütme döngüsü, mikrobiyal ve enerji metabolizmasının fizyolojik sürecinin yanı sıra belirli koşullar altında ham maddelerin işlenmesinden oluşan entegre bir sistemi temsil etmektedir. Ancak mikrobiyal topluluk, uygulanan çalışma koşullarındaki değişikliklere karşı duyarlı olduğundan eğer uygun şekilde süreç yönetilmezse istikrarsız hale gelir ve biyogaz üretiminin azalmasına neden olmaktadır. Biyogaz üretimi için anaerobik çürütme sürecini etkileyen başlıca faktörler; sıcaklık, ortam pH değeri (ideali: 6,8-7,4), karbon/azot oranı (ideali 20-35 arası), çürütücüye organik madde yükleme oranı ve organik maddenin parçalanmasının tamamlanma (ortalama 15-30 gün) süresidir (Mao vd., 2015). Sıcaklık, anaerobik çürütücü içindeki mikrobiyal büyüme hızını ve aktivitelerini kontrol eden en önemli faktörlerden biridir. Özellikle soğuk kış aylarında anaerobik çürütücüde stabil biyogaz üretimi için istenen sıcaklığı elde etmek ve korumak amacıyla üretilen biyogazın bir kısmıyla çalışan bir motordan, katı yakıtlı bir kazandan ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen ısı biyogaz tesislerinde genellikle ısıtma kaynağı olarak kullanılmaktadır (Zhang vd., 2016).

Anaerobik çürütme kullanılarak gerçekleştirilen biyogaz üretimi için bitkisel, hayvansal ve çevresel kaynaklar kullanılmaktadır. Bu kaynaklardan bazılarına ait biyogaz verimi ve metan hacim oranları Tablo-2'de verilmiştir.

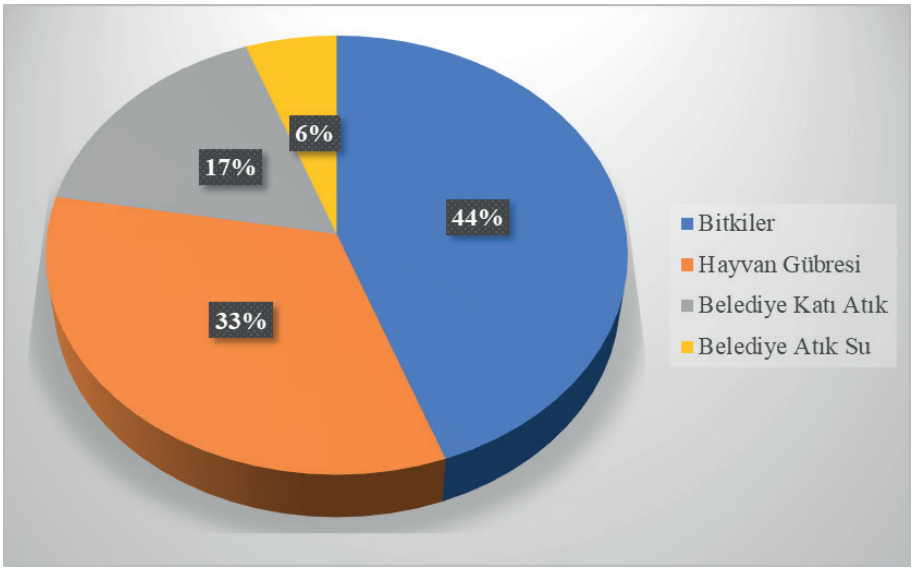
Tablo-2. Kaynaklara göre biyogaz verimleri ve metan hacim oranları (TÜBA, 2022)

Kaynak	**Biyogaz Verimi (L/kg organik kuru madde)**	**Metan Hacim Oranı (%)**
Sığır Gübresi	90-310	65
Buğday Samanı	200-300	50-60
Çavdar Samanı	200-300	59

Dökülmüş Ağaç Yaprakları	210-290	58
Çimen	280-550	70
Arpa Samanı	290-310	59
Ziraat Artıkları	310-430	60-70
Kanatlı Gübresi	310-620	60
Atık Su Çamuru	310-800	65-80
Sebze Artıları	330-360	Değişken
Domuz Gübresi	340-550	65-70
Keten-Kenevir	360	59
Mısır Sapları ve Artıkları	380-460	59
Algler	420-500	63

Tablo-2 incelendiğinde, biyogaz verimi farklı kaynaklara göre 90-800 L/kg organik kuru madde arasında değişirken metan hacim oranının %50-%80 arasında olduğu görülmektedir. Sığır gübresi biyogaz verimi 90-310 L/kg organik kuru madde ve %65 metan hacim oranına sahipken sebze artıklarında bu değerler sırasıyla 330-360 L/kg organik kuru madde ve değişken oranda metan hacim oranıdır. Kırsalda elde edilecek sebze artıları ve hayvan gübrelerinden şehirlerde bulunan atık su çamurlarına kadar birçok madde biyogaz üretiminde kaynak olarak kullanılabilmektedir. Bu açıdan belirlenen bölgelerde atıkların kullanılarak biyogazın üretilmesi ve bu biyogazın faydalı ısı ve güç enerjisine çevrilmesi büyük önem taşımaktadır. Avrupa Birliğinin 2018 yılı hammadde türüne göre biyogaz üretimi Şekil-1'de verilmiştir.

Şekil-1. Avrupa Birliğinin 2018 yılı hammadde türüne göre biyogaz üretimi (IEA, 2020)



Şekil-1 incelendiğinde, Avrupa Birliği ülkelerinin 2018 yılında biyogaz üretimini gerçekleştirdikleri başlıca hammaddenin bitki mahsul atıkları (yaklaşık 8 MTEP) olduğu görülürken en az biyogaz üretilen hammadde ise belediye atık suları olmuştur. 2021 yılı Türkiye'de biyokütle kaynakları ve potansiyeli Tablo-3'te verilmiştir.

Tablo-3. 2021 yılı Türkiye'de biyokütle kaynakları ve potansiyeli (TÜBA, 2022)

Kaynaklar	**Veriler**
Toplam Hayvan Sayısı (adet)	422.832.374
Hayvansal Atık Miktarı (ton/yıl)	193.878.079
Hayvansal Atıkların Enerji Değeri (Teorik) (TEP/yıl)	4.385.371
Hayvansal Atıkların Enerji Değeri (Ekonomik) (TEP/yıl)	1.084.506
Bitkisel Üretim Miktarı (Orman Hariç) (ton/yıl)	171.399.002
Bitkisel Atık Miktarı (ton/yıl)	62.206.754
Bitkisel Atıkların Enerji Değeri (Teorik) (TEP/yıl)	25.384.268
Bitkisel Atıkların Enerji Değeri (Ekonomik) (TEP/yıl)	1.462.159
Belediye Katı Atık Miktarı (ton/yıl)	32.170.975
Belediye Atıklarının Enerji Değerleri (Teorik) (TEP/yıl)	3.373.011
Belediye Atıklarının Enerji Değerleri (Ekonomik) (TEP/yıl)	485.858
Orman Atıklarının Enerji Değerleri (Ekonomik) (TEP/yıl)	859.899
Atıkların Toplam Ekonomik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	3.892.422

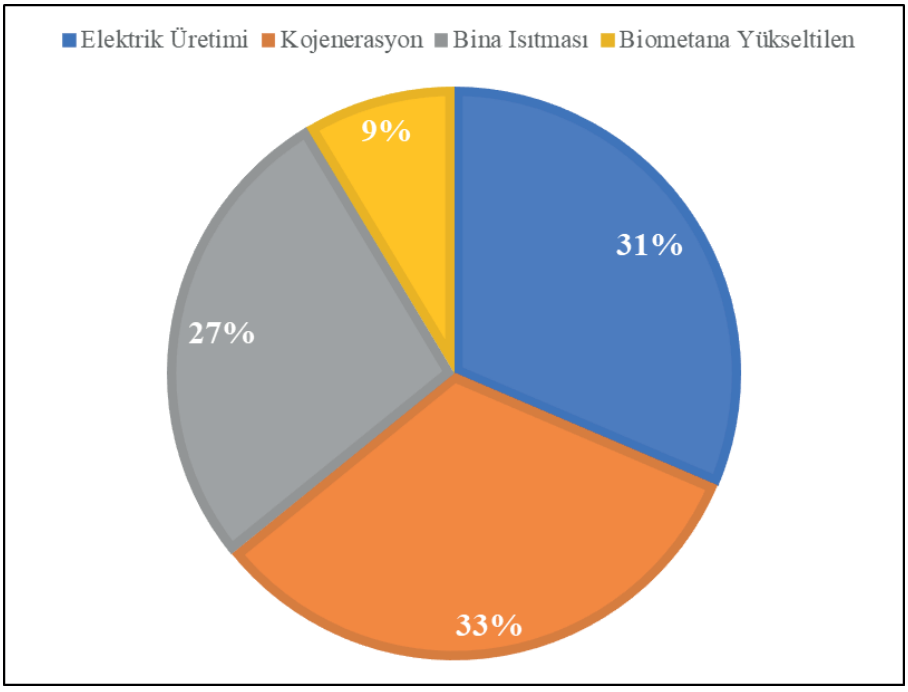
Tablo-3 incelendiğinde, ülkemizde 2021 yılında toplam hayvan sayısı 422.832.374 adet iken hayvansal atık miktarı yıllık 193.878.079 ton olarak

bulunmuştur. Bununla birlikte, hayvansal atıkların ekonomik enerji değeri 1.084.506 TEP/yıl olarak hesaplanırken bitkisel atıkların ekonomik enerji değeri 1.462.159 TEP/yıl olarak bulunmuştur. Belediye ve orman atıkları da göz önüne alındığında 2021 yılı ülkemizdeki atıkların toplam ekonomik enerji eşdeğeri 3.892.422 TEP/yıl olarak hesaplanmıştır.

Biyogaz Kullanımı

Biyogaz üretildikten sonra depolama yüksek verimli olarak kullanılabilmesi ve sisteme zarar vermemesi için içindeki sülfür içeriğinden dolayı saflaştırılıp temizlenmesi gerekmektedir. Temizlenmiş halde tanklarda depolanan biyogaz istenilen yerde amacı doğrultusunda kullanılmaktadır. Biyogaz; ısıtma ve/veya buhar üretiminde (Coelho vd., 2015; Picardo vd., 2019), birleşik ısı ve güç üretiminde (Ishikawa vd., 2021), ısı-güç-soğutma sistemlerinde (Mirmasoumi vd., 2018), araç yakıtlarında (Börjesson ve Mattiasson, 2008) ve yakıt hücreleri için (Galvagno vd., 2013) kullanılmaktadır

Şekil-2. Avrupa Birliğinin 2018 yılı nihai kullanıma göre biyogaz tüketimi (IEA, 2020)

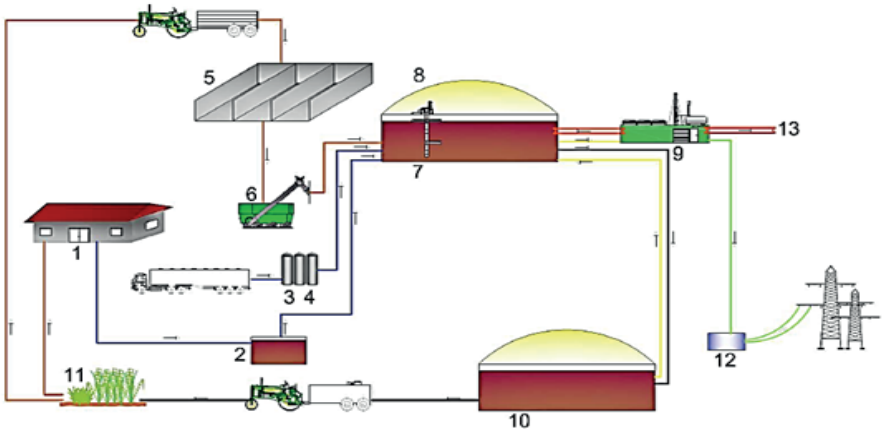


Avrupa Birliğinin 2018 yılı nihai kullanıma göre biyogaz tüketimi Şekil 2'de verilmiştir. Şekil-2 incelendiğinde, Avrupa Birliği ülkelerinde 2018 yılında toplam biyogaz tüketiminin %33'ü kojenerasyon santrallerinde, %31'i elektrik üretiminde, %27'si bina ısıtmasında ve %9'u ise biyogazın biyometana yükseltilmesinde kullanılmıştır. Esen ve Yüksel, Türkiye'nin doğusundaki

Elazığ ilinde tipik kış koşullarında 24 m^2 büyüklüğündeki bir serayı ısıtmak için biyogazın verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Birçok bitkinin büyümesi için gerekli olan 23 °C sıcaklık değerini ele almışlar ve reaktörde ürettikleri toplam 2231,83 L biyogazı kış periyodu boyunca seranın ısıtılmasında yeterli olduğunu ortaya koymuşlardır (Esen ve Yuksel, 2013). Jabari vd. düşük enerjili ve sıfır emisyonlu önerdikleri mikro-kojenerasyon tesisinde, enerji üretimi ve yazın iklimlendirme için biyogaz yakıtlı bir gaz türbini çevrimi tasarlanmıştır. Toplam enerji satın alma maliyetini en aza indirmek, toplam soğutma yükünü karşılamak için kullanılan elektrikli soğutucuların optimum çalışma noktalarını bulmuşlar ve 24 saatlik bir süre boyunca elektrikli araçların günlük sürüş şekillerini dikkate alarak en uygun şarj ve deşarj için karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama problemi çözmüşlerdir. Simülasyonları, İran'ın Ahvaz kenti gibi tropik bir bölgede bulunan ve ortam sıcaklığı aralığının 20-45°C olduğu bir referans binada uygulamışlardır (Jabari vd., 2018). Biyogazın araç yakıtı olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur. Papacz yaptığı çalışmada biyogazın ulaşım yakıtı olarak potansiyel rolünü ortaya koymuştur. Biyogazın ulaşım yakıtı olarak kullanılabilmesi için hacimce en az %95 metana yükseltilmesi gerektiği ve daha sonra doğal gazla çalışacak şekilde orijinal olarak değiştirilmiş araçlarda kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Biyogaz yakıtlı araçlar, fosil yakıtlara kıyasla CO_2 emisyonlarının %75 ile %200 arasında azaltabildiğini ortaya koymuştur (Papacz, 2011).

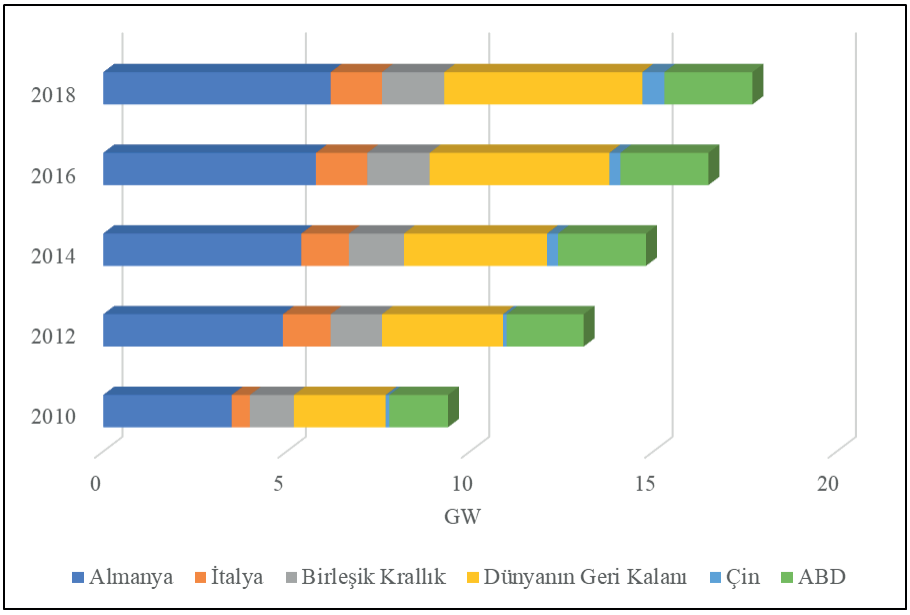
Biyogazın yaygın olarak kullanımı hem tek başına hem de ısıtmayla birleşik olarak gerçekleştirilen elektrik üretimidir. Akbulut vd. Malatya'ya 39 km uzaklıktaki Akçadağ'da bulunan yıllık 26.572 ton girdi kapasiteli büyük ölçekli bir biyogaz enerji tesisini tekno-ekonomik açıdan incelemişlerdir. Günlük 72,8 ton süt ineği ve kanatlı hayvan gübresi içeren hammaddeden sırasıyla 229,49 m3/saat biyogaz ve 139,08 m3/saat metan üretimi gerçekleşirken çürütülmüş hammaddeden yıllık 5.256.000 kWh elektrik üretiminin gerçekleştiğini ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte, 40.891,03 ton/yıl katı ve 5.152,74 ton/yıl sıvı gübre üretildiğini ve birleşik ısı-güç sisteminin verimini %80,26 olarak bulmuşlardır (Akbulut vd., 2021). Biyogazdan elektrik üretimi gerçekleştirilen bir biyogaz santralinin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.

Şekil-3. Bir biyogaz santralinin şematik gösterimi (Seadi vd., 2008)



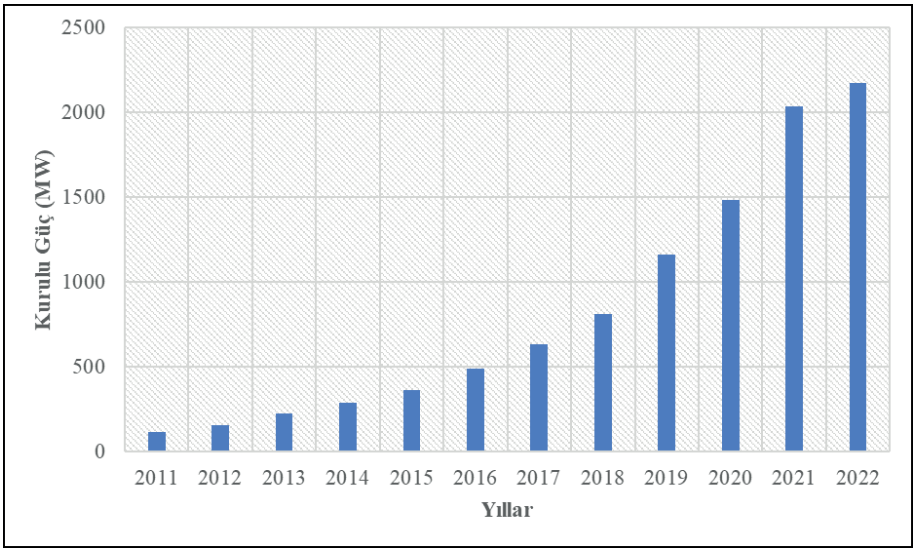
Şekil-3 incelendiğinde, büyükbaş veya küçükbaş ahırlarından, biyolojik atıklardan, sanitasyon ve depolama tanklarından elde edilen hammaddelerin depolanması, şartlandırılması ve çürütücü tankı taşınması ilk aşamayı oluşturmaktadır. İkinci aşamada ise anaerobik çürütmenin meydana geldiği biyogaz reaktöründe biyogazın üretilmesi gerçekleştirilmektedir. Fermantasyon ürünlerinin depolanması ve tarlalarda gübre olarak kullanılması üçüncü aşamayı oluşturmaktadır. Son aşamada, biyogazın depolanması, şartlandırılması ve kojenerasyon santralinde kullanılması gerçekleşmektedir. Santralde üretilen elektrik trafo yardımıyla şebekeye verilirken üretilen ısı ise ihtiyaç duyulan alanlara yönlendirilmektedir. Elektrik üretimine yönelik dünyada ve özellikle Avrupa Birliğinde yıllara göre artış meydana gelmiştir. Şekil-4'te 2010-2018 yılları arasındaki biyogaz kurulu gücün ülkelere göre değişimi verilmiştir.

Şekil-4. 2010-2018 yılları arasındaki biyogaz kurulu gücün ülkelere göre değişimi (IEA, 2020)



Şekil-4 incelendiğinde, biyogaz santrali kurulu gücün 2010'dan 2018'e kadar tüm dünyada artış gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, biyogazdan elektrik üretimi konusunda en önde olan ülkenin Almanya olduğu ona en yakın ülkenin ise ABD olduğu görülmektedir. Almanya'nın kurulu gücünün dünyanın geri kalanını kurulu gücünden yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Şekil-5'te ülkemizin biyokütle ve atık ısıdan elektrik üretim kurulu gücünün yıllara göre değişimi verilmiştir.

Şekil-5. Türkiye'nin biyokütle ve atık ısıdan elektrik üretim kurulu gücünün yıllara göre değişimi (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022)



Şekil-5 incelendiğinde, ülkemizin biyokütle ve atık ısıdan kurulu elektrik gücü 2011 yılından itibaren 2022 yılı Haziran ayına kadar hızlı bir şekilde artmıştır. 2011 yılında 115 MW olan kurulu güç, 2016 yılında 489 MW'a ve 2021 yılında ise 2035 MW değerine ulaşmıştır. 2019 yılında 1163 MW olan kurulu güç kısa bir sürede 2022 Haziran ayında neredeyse iki katına çıkarak 2172 MW değerine ulaşmıştır.

SONUÇ

Küresel ısınmanın düzeyini ve karbon ayak izini azaltmak için fosil kökenli kaynakların kullanımı sınırlandırılarak çevreci ve yüksek verimli alternatif sistemlerin kullanılması teşvik edilmelidir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyoyakıtlar dünya atmosferindeki karbondioksitte net bir artışa neden olmadığı için ön plana çıkmaktadır (Working Group II Technical Support Unit, 2022). Biyoyakıtın kullanılması biyolojik olarak parçalanabilen atıkların değerlendirilmesini sağlamakta ve ülkelerin enerji çeşitliliğini arttırmaktadır. Ayrıca, sindirilmiş biyolojik gübrenin kullanılmasıyla önemli miktarda suni gübre ve sulama suyundan tasarruf edilebilmektedir (Szabó vd., 2014). Son yıllarda, gelişmekte olan ülkeler de enerji kaynaklarını çeşitlendirmekte ve bu çeşitlilikte yenilenebilir enerji kaynaklarının ağırlığını arttırmaktadırlar. Düşük karbon emisyonu ve özellikle çevreye zararlı atıkların geri kazanılmasını sağlayan biyokütle ve biyogaz üretim sistemlerinin kullanımının her geçen gün artması beklenmektedir. Bu çalışmada biyogazın üretim süreçleri detaylı bir şekilde ele alınarak kullanım yöntemleri incelenmiştir. Bununla birlikte, mevcut kullanım durumları ortaya koyularak gelecekte hedeflenen yararlanma oranları yönelik çalışmalar irdelenmiştir.

Biyogaz çoğunlukla anaerobik koşullar altında bir sindirim sürecinden üretilmektedir. Anaerobik çürütme döngüsü, mikrobiyal ve enerji metabolizmasının fizyolojik sürecinin yanı sıra belirli koşullar altında ham maddelerin işlenmesinden oluşan entegre bir sistemi temsil etmektedir. Biyogaz üretimi için anaerobik çürütme sürecini etkileyen başlıca faktörler; sıcaklık, ortam pH değeri, karbon/azot oranı, çürütücüye organik madde yükleme oranı ve organik maddenin parçalanmasının tamamlanma süresidir (Mao vd., 2015). Kırsalda elde edilecek sebze artıları ve hayvan gübrelerinden şehirlerde bulunan atık su çamurlarına kadar birçok madde biyogaz üretiminde kaynak olarak kullanılabilmektedir. Bu açıdan belirlenen bölgelerde atıkların kullanılarak biyogazın üretilmesi ve bu biyogazın faydalı ısı ve güç enerjisine çevrilmesi büyük önem taşımaktadır. Ülkemizde ve dünyada her geçen yıl biyogazdan yaralanma oranı artmakta ve elektrik üretimindeki biyogazın payının gelecekte daha fazla artması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

Akbulut, A., Arslan, O., Arat, H., Erbas, O. 2021. Important aspects for the planning of biogas energy plants: Malatya case study. *Case Studies in Thermal Engineering*, *26*, 101076.

Börjesson, P., Mattiasson, B. 2008. Biogas as a resource-efficient vehicle fuel. *Trends in Biotechnology*, *26*(1), 7-13.

Coelho, B., Oliveira, A., Schwarzbözl, P., Mendes, A. 2015. Biomass and central receiver system (CRS) hybridization: Integration of syngas/biogas on the atmospheric air volumetric CRS heat recovery steam generator duct burner. *Renewable Energy, 75*, 665-674.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2022. "Biyokütle Enerjisi Potansiyelimiz". 13 Kasım 2023 tarihinde https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle adresinden erişildi.

Esen, M., Yuksel, T. 2013. Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy and Buildings*, *65*, 340-351.

Galvagno, A., Chiodo, V., Urbani, F., Freni, F. 2013. Biogas as hydrogen source for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy, 38*(10), 3913-3920.

IEA. 2020. "*Outlook for Biogas and Biomethane*". 13 Kasım 2023 tarihinde https://iea.blob.core.windows.net/assets/03aeb10c-c38c-4d10-bcec-de92e9ab815f/Outlook_for_biogas_and_biomethane.pdf adresinden erişildi.

Ishikawa, S., Connell, N. O., Lechner, R., Hara, R., Kita, H., Brautsch, M. 2021. Load response of biogas CHP systems in a power grid. *Renewable Energy*, *170*, 12-26.

Jabari, F., Mohammadi-ivatloo, B., Bannae-Sharifian, M. B., Ghaebi, H. 2018. Design and performance investigation of a biogas fueled combined cooling and power generation system. *Energy Conversion and Management*, *169*, 371-382.

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., Ren, G. 2015. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45*, 540-555.

Meng, L., Jin, K., Yi, R., Chen, M., Peng, J., Pan, Y. 2020. Enhancement of bioenergy recovery from agricultural wastes through recycling of cellulosic alcoholic fermentation vinasse for anaerobic co-digestion. *Bioresource Technology*, *311*, 123511.

Mirmasoumi, S., Khoshbakhti Saray, R., Ebrahimi, S. 2018. Evaluation of thermal pretreatment and digestion temperature rise in a biogas fueled combined cooling, heat, and power system using exergo-economic analysis. *Energy Conversion and Management*, *163*, 219-238.

Papacz, W. 2011. Biogas as Vehicle Fuel. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, *18*(1), 403–410.

Patinvoh, R. J., Osadolor, O. A., Chandolias, K., Sárvári Horváth, I., Taherzadeh, M. J. 2017. Innovative pretreatment strategies for biogas production. *Bioresource*

Technology, 224, 13-24.

Pelaez-Samaniego, M. R., Perez, J. F., Ayiania, M., Garcia-Perez, T. 2020. Chars from wood gasification for removing H2S from biogas. *Biomass and Bioenergy*, *142*, 105754.

Picardo, A., Soltero, V. M., Peralta, M. E., Chacartegui, R. 2019. District heating based on biogas from wastewater treatment plant. *Energy*, *180*, 649-664.

Seadi, T. Al, Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R. 2008. *Biogas Handbook*. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg.

Sofokleous, M., Christofi, A., Malamis, D., Mai, S., Barampouti, E. M. 2022. Bioethanol and biogas production: An alternative valorisation pathway for green waste. *Chemosphere*, *296*, 133970.

Szabó, G., Fazekas, I., Szabó, S., Szabó, G., Buday, T., Paládi, M., … Kerényi, A. 2014. The carbon footprint of a biogas power plant. *Environmental Engineering and Management Journal, 13*(11), 2867-2874.

Szymańska, D., Lewandowska, A. 2015. Biogas power plants in Poland-Structure, capacity, and spatial distribution. *Sustainability* (Switzerland), *7*(12), 16801-16819.

Taleghani, G., Kia, A. S. 2005. Technical-economical analysis of the Saveh biogas power plant. *Renewable Energy*, *30*(3), 441-446.

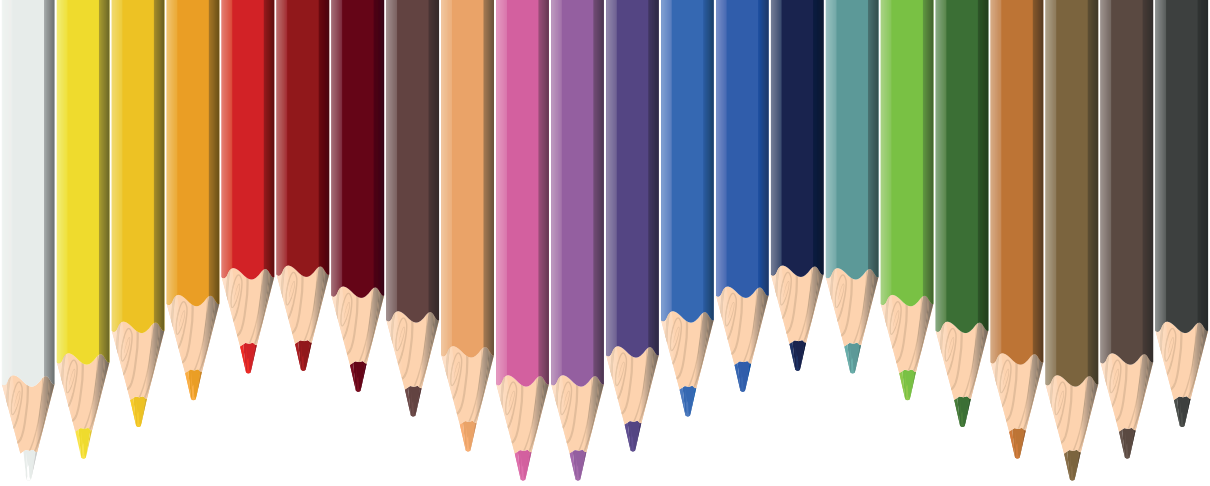
TÜBA. 2022. "*Biyokütle Enerjisi Raporu*". (M. H. ALMA, Ed.) (TÜBA Rapor). Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları. 13 Kasım 2023 tarihinde https://tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-01-6.pdf adresinden erişildi.

Vamvuka, D. 2011. Bio-oil, solid and gaseous biofuels from biomass pyrolysis processes-An overview. *International Journal of Energy Research, 35*(10), 835-862.

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., Jones, D. L. 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology, 99*(17), 7928-7940.

Working Group II Technical Support Unit. 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. USA. 13 Kasım 2023 tarihinde ttps://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf adresinden erişildi.

Zhang, G., Li, Y., Dai, Y. J., Wang, R. Z. 2016. Design and analysis of a biogas production system utilizing residual energy for a hybrid CSP and biogas power plant. *Applied Thermal Engineering*, *109*, 423-431.



Bölüm 8

PARSEL VE SİTE İÇİ OTOPARK DÜZENLEMESİNİN İRDELENMESİ

Fazıl NACAR[1]

1 Doç.Dr.

1-GİRİŞ:

Günümüzde araç sayısının nerdeyse insan nüfusuyla yarışıyor olması hem şehrinsel alanda hemde konut alanlarının bulunduğu site ve parsel içi alanda otopark ihtiyacını artırmıştır.

Günlük hayatta otomobil kullanımı ev halkının zamansal ve konumsal aktivitlerine göre farklılık arz etmektedir. Araçlar ev halkının şehirde aktif olduğu zamanlarda yaklaşık 1-2 saat kullanılıyor, geri kalan 22-23 saat ise gün içerisinde park halinde kalmaktadır. Bir araçlık otopark için minimum 15 m2 alana ihtiyaç duymaktadır (Şenbil ve Yetişkul, 2016).

Gece saat 22.00'de bir şehirde arabaların neredeyse %90'ı hanenin oturduğu evin etrafına park ediliyor. Sabah saat 9.00'da bu oran yüzde 40'a düşüyor; Bir araba bir konutun yakınında ortalama 13 saat 25 dakika park edilmektedir. Konutların yakınında gece park edilmesinin yerini, gündüz saatlerinde konut dışı faaliyetlerin yakınında, genellikle süresi daha kısa olan gündüz park etme almaktadır. En uzun gündüz park yeri ortalama 8 saat süreyle işyeri çevresinde park edilmesidir

Otoparklar kişilerin yerleşme planlarını etkilemektedir. Şehirlerde özellikle toplu konut ve site alanlarında otoparklarla ilgili sık karşılaşılan sorunlar; giriş ve çıkışların güvensiz olması, park yerlerinin yetersiz olması ve buna bağlı olarak site dahilindeki yolların arabalar tarafından işgal edilmesi, yetersizlik nedeniyle düzensizlik ve işlevsizlik olarak sıralanabilir.

(Dönmez, Özyavuz ve Gökyer, 2015; Özyavuz ve Dönmez, 2016; Yücedağ, Kaya ve Altunay, 2017;) Çay, R. D. ,2020)

Otopark mevzuatına göre kullanım çeşidi ve yararlanıcılara göre bina ve parsel otoparkları, genel ve bölge otoparklar, dur – kalk otoparklar şeklinde bir sınıflandırma mevcuttur. Mevzuata göre parsel ve bina otoparkları, imar parsellerindeki yapıların bodrum katlarında, yan ve arka bahçelerin doğal veya düzleştirme kotu altında, ya da bu bahçelerde açık otopark olarak kurulurlar. Genel ve bölge otoparklar, planlama da otopark alanı olarak ayrılan yerlerde yer altında veya üstünde , çok katlı, kapalı veya açık olarak yapılan, işletmesinin valilik veya belediye sorumlulugundaki otoparklardır.

Otopark mevzuatına göre parsel ve bina otoparkları, imar parsellerinde bulunan yapıların bodrum katlarında, yan ve arka bahçelerin doğal veya düzenlenmiş kotunda veya bu bahçelerde açık otopark olarak kurulur.

Bu çalışmada özellikle küçük parsellerde parsel içinde bina yada apartmanın otopark ihtiyacının nasıl çözüleceği konusunda değerlendirme yapılmıştır.Özellikle tek blokluk 1000m2 civarındaki parsellerde otopark çözümünüm bodrum yerine zemin katta çözülmesinin faydaları değerlendirilmiştir. Zemindeki otopark çözümünün Taks ve Kaks a etkileri de araştırılmıştır.

2. Materyal Metod

2.1 Otopark tanımı

Trafiğe uygun ve araçların belirli bir süre bırakıldığı açık veya kapalı yer, otopark, park.(TDK)

Otopark tasarımı binanın tipine ve kullanıcısına göre değişmektedir. Parsellerin şekilleri, fiziksel yapıları ve kullanım amaçları otopark tasarımında büyük rol oynamaktadır. Bunların yanı sıra tasarımın mühendislik hesaplamaları ve estetik kaygıları da diğer önemli unsurlardır.

2-2 Otopark Problemleri:

Sanayi ve ticaretin gelişmesi sonucu şehirlerdeki insan sayısının artması, park yeri sorununu yaratmaktadır. Hem araç sayısının artması, hem de çarpık kentleşme bu sorunun daha da yoğunlaşmasına neden olmaktadır.

Özellikle şehir merkezlerinde ticaret ve işyerlerinin yoğunlaştığı yerlerde park alanları büyük sorun teşkil ediyor. Şu anda imar planlarında tahsis edilmesi gereken otopark alanının ya hiç tahsis edilememesi ya da mali yetersizlik nedeniyle kamulaştırılamaması sorunu daha da çözümsüz hale getirmektedir.

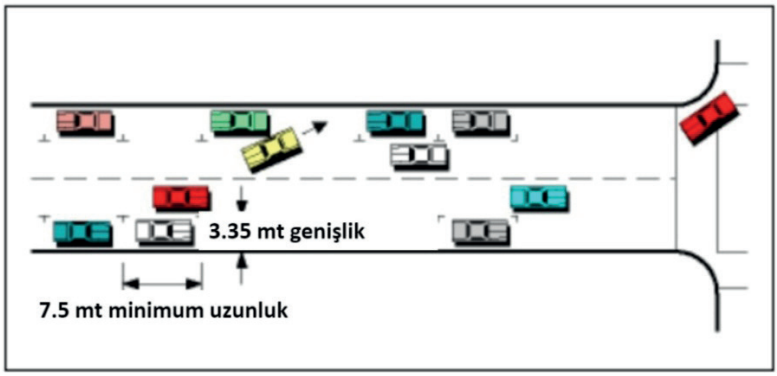
Şehir merkezi dışında kalan yerlerde, küçük parsellerde bina tasarımı yapıldıktan sonra yanlış planlama veya yanlış parselleme sonucu otopark alanı bulunamaması günümüz şehirlerinin en büyük sorunları arasında yer almaktadır. Parsel içinde yer bulamayan araçlar yol kenarına park etmektedir. Bu durum kötü bir sokak silueti oluşturmakta ve kötü planlama sonucu dar yolların daha da daralmasına, trafik sıkışıklığına neden olmaktadır.

2-3 Otopark Tipleri:

A-Cadde kenarı otopark

B-Cadde dışı otopark

- **A-Yol kenarı otoparklar:** Yolun bir tarafında veya iki tarafında arabaların park etmesine izin verilir.



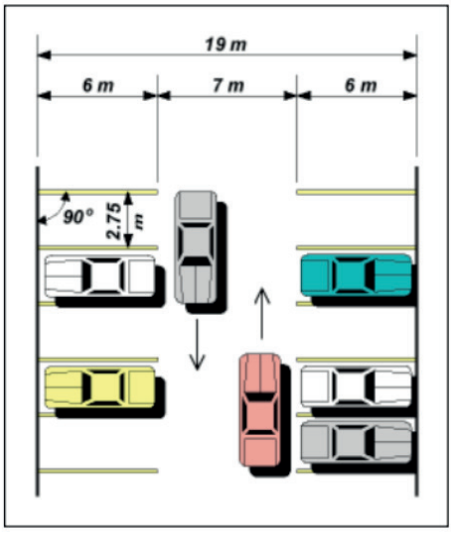
Şekil .1 Yol kenarı otopark

➢ **B-Cadde dışı otoparklar:**

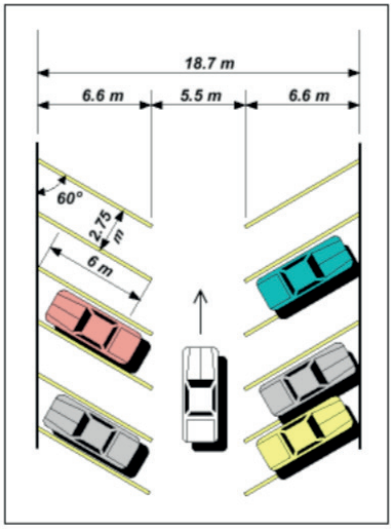
•Kamu kurumlarına veya özel şahıslara ait otoparklar olup, çok sayıda aracın parkına imkan tanır.

• Havaalanları , alışveriş merkezleri, istasyonlar, özel otoparklar bu sınıfta algılanabilir.

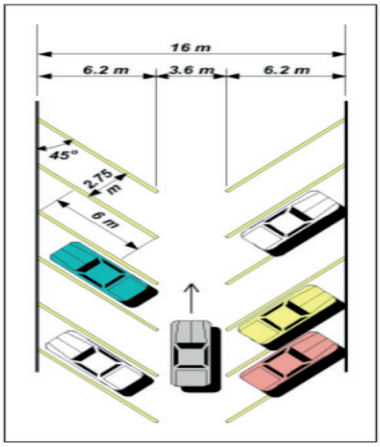
2-4 Otopark Şekilleri

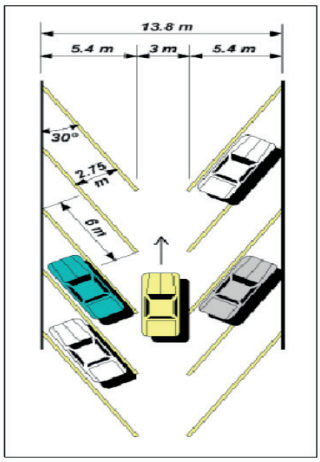


90°LİK OTOPARK ALANI
100 *uzunlukta 72 araç parkedebilir*
a)



60°LİK OTOPARK ALANI
100 mt uzunluğa 62 araç
b)





45°LİK açıyla araçlar yerleşir
100 mt de 50 araç parkedebilir
c)

30°LİK açıyla araçlar yerleşir
100 mt de 36 araç parkedebilir
d)

Şekil 2 a-b-c-d Otopark şekilleri (Otopark Etüdleri. Karaşahin ,M)

2-5 Tanımlar:

➢ **Mevzuata** göre tanımlar:

Binanın yola cephesi olmayan ve arka komşusu ile olan sınıra uzaklığı **arka bahçe** olarak tanımlanır.

Binanın ön cephesinin yola olan uzaklığı **ön bahçe** , komşu parsel sınırına uzaklığı **yan bahçe** (ön ve arka bahçe dışındaki) olarak adlandırılır. Parselin imar planı ve imar mevzuatına göre parsel içerindeki yapılaşma şartlarını gösteren **belge imar durum belgesidir**.

Yapının ön hat çizgisi ile arka hat çizgisinin en uzak noktası arasındaki dik uzaklığa **bina derinliği denmektedir**

Parsel ön hat çizgisi ile arka hat çizgisi köşe noktalarından indirilen dik hatların ortalama uzunluğu , **Parsel derinliği olarak tanımlanmaktadır.**

Yapı nizamı: ayrık, blok ve bitişik nizam olarak sınıflandırlır.

1) Ayrık nizam: Komşu parseldeki binalara hiç bir yanından bitişik olmayan yapı nizamı,

2) Bitişik nizam: Komşu parsellerdeki binalara bitişik olan ve ortak alandan arka bahçeye çıkış sağlanan yapı nizamı

3) Blok nizam: Cephe uzunluğu, derinliği ve yüksekliği mevzuata göre belirlenmiş yapı kitlesinin, bir parsel veya birden fazla parsel üzerine oturduğu bahçeli yapı nizamı

Arsalara İlişkin Hükümler:

Parsel genişlikleri;

a) Konut ve ticaret bölgelerinde:

1) 4 kata kadar (4 kat dâhil) inşaata müsait yerlerde:

Bitişik nizamda: 6.00 metreden, Blok başlarında: Yan bahçe mesafesi 6.00 metreden,

Ayrık nizamda: Yan bahçe mesafeleri toplamı + (6.00) metreden, az olamaz.

2) 9 kata kadar (9 kat dâhil) inşaata müsait yerlerde:

Bitişik nizamda: (9.00) metreden, Blok başlarında: Yan bahçe mesafeleri toplamı + (9.00) metreden, Ayrık nizamda: Yan bahçe mesafeleri toplamı + (9.00) metreden, az olamaz.

3) 10 veya daha fazla katlı inşaata müsait yerlerde:

Bitişik nizamda: (12.00) metreden, Blok başlarında: Yan bahçe mesafesi + (12.00) metreden,

Ayrık nizamda: Yan bahçe mesafeleri toplamı + (12.00) metreden, az olamaz.

e) Bu fıkradaki ölçülerin tespitinde, köşe başına rastlayan parsellerde yol tarafındaki yan bahçe yerine, o yol için tayin edilmiş ön bahçe mesafesi alınır.

Parsel derinlikleri:

a) Konut ve ticaret bölgelerinde:

1) Ön bahçesiz nizamda: (13.00) metreden,

2) Ön bahçeli nizamda: Ön bahçe mesafesi + (13.00) metreden, az olamaz.

2) Ön bahçeli nizamda: Ön bahçe mesafesi + (5.00) metreden, az olamaz.

(5) Parsel büyüklükleri hakkındaki hükümlere uymayan arsalarda, yeni veya ilave yapı ruhsatı düzenlenemez.

Taks Ve Kaks Tanımları

TAKS: (Taban alanı Katsayısı) Bina taban alanının parsel alanına oranı olarak tanımlanır.

Taban alanı, parsel alanı üzerinden uygulama imar planıyla veya mevzuatla belirlenir.

Taks hesabına katılmayacak kullanımlar;

a) Doğal zemin veya düzlenmiş zemin seviyesindeki veya altındaki avlular, iç bahçeler,

b) Bağımsız bölüm olarak düzenlenmeyen veya bağımsız bölümün eklentisi niteliği taşımayan, pergola, kameriye ,sundurma ve süs havuzu,

ç) Güvenli ve Çevre düzenlemesi için yapılan bahçe duvarı, altı metrekareden küçük kulübeleri,

d) Yangın Yönetmeliğinin gerektirdiği , normal merdiven dışında kaçış yolu içerisinde,bulunan, minimum boyut ve adetlerde yapılan merdiven evi ile yangın güvenlik holleri,

e) Minimum boyutlardaki; temele kadar inen asansör boşlukları, ışıklıklar, çöp ve atık ayrıştırma bacaları, hava bacaları, şaftlar,

h) Açık otoparklar,

KAKS : (Katlar alanı katsayısı) Toplam bina inşaat alanının arsa alanına oranı olarak tanımlanır.

Katlar alanı hesabına dâhil edilmeyen kullanımlar

a) Taban alanına dâhil edilmeyen kullanımlar,

c) Üstleri çıkarılabilir hafif malzemeyle, kenarları rüzgarı kesen cam panellerle kaplanmış olsa bile açık oturma alanları,

ç) Bu Yönetmeliğe göre yapılması zorunlu olan kapıcı dairelerinin toplam 70 m2'si,

d) Atrium ve galeri boşlukları,

e) Mescit ve müştemilat,(orta kullanım durumundaki)

h) Otopark alanları,

ı) Bina yüksekliği 60,50 metreden fazla olan binalarda ve özelliği gereği tesisat katı oluşturulması gereken binalarda sadece tesisat için oluşturulan tesisat katları,

i)) Bina veya tesise ait ısıtma, soğutma, montaj alanı, su sarnıcı, havalandırma sistemleri ve enerji verimliliği sistemleri, arıtma tesisi, gri su toplama havuzu, yakıt ve su depoları, silolar, trafolar, jeneratör, ısı merkezi, enerji odası Kömür hangar, eşanjör ve hidrofor bölümleri,

j) Tüm cepheleri tamamen toprak altında olan bodrum katlarda ve kısmen açıkta kalan yol cephesi dışındaki bodrum katları, tek başına bağımsız bölüm teşkil etmeyen, bağımsız bölümün uzantısı olmayan, ticari amaç taşımayan, sadece binada oturanların kullanımına yönelik, toplamda emsal hesabına konu alanın % 5'ini ve 1000 m2'yi geçmeyen ortak alan niteliğindeki yönetim ve toplantı odaları ile spor ve sosyal mekânlar,

k)) Bodrum katlarda yer alan, tüm cepheleri tamamen yeraltında bulunan, tek başına bağımsız bölüm oluşturmayan ve bağımsız bölüm net alanının %50'sini aşmayan depolama amaçlı eklentiler,

l) Bağımsız bölümün net alanının %15'ini aşmamak kaydıyla açık çıkış şartlarını sağlayan balkon, kat ve ara sahanlıklar dahil açık veya kapalı merdivenler konut taban alanına dahil değildir.

Bahçe uzaklıkları

Uygulama imar planında, aksine bir hüküm bulunmadığı durumlarda bahçe mesafeleri;

a) Ön bahçe uzaklığı minimum 5.00 metredir.

b) Yan bahçe uzaklığı minimum 3.00 metredir.

c) Arka bahçe uzaklığı minimum 3.00 metredir.

ç) Yan ve arka bahçe uzaklıkları; doğal veya düzlenmiş zeminin üzerinde kalan bodrum katları da dâhil, dörtten fazla katlı binalarda 4 katın üzerindeki her kat için 0.50 metre artırılır. Bu hüküm parsellerin park alanına komşu cephelerinde uygulanmaz.

--Ön bahçe uzaklığı 7.00 m ye kadar artırılmak şartıyla, bina cephesinin 2.00 metre dışında kalan kısım açık otopark yapılabilir.

1.6 **Otopark Yönetmeliği'ne Göre Tanım Ve Mevzuatlar:**

- **Bina otoparkları:** Binayı çeşitli amaçlarla kullanan kişi ve kuruluşlara ait ulaşım ve ulaşım araçları için bu bina veya bu binanın bulunduğu parsel üzerinde kapalı veya açık alanda düzenlenen otoparkları,

Açık otopark: Doğal veya düz zemin üzerine inşa edilmiş, zemini su geçirgen malzeme ile kaplanmış, panel içerebilen baraka benzeri yapılarla örtülebilen, otopark hizmetinin sağlanması için zorunlu olan araç park yerlerini ifade eder

tek katlı ve altı metrekareyigeçmeyen yönetim/güvenlik birimini içeren otoparkları,

- **Yol üstü araç park yeri:** Cadde veya cadde üzerinde, yaya kaldırımından ayrılmış bir cepte, yolun sağ tarafında veya refüjde, yol standartlarına uygun yatay ve dikey işaretlemelerle ayrılmış, görülebilir şekilde Motorlu veya motorsuz taşıtların kullanım süresi ve idarece belirlenen kullanım şartlarına ilişkin diğer hususlar. Park edebileceğiniz alanı ifade eder.

Binek araçlar için birim park alanı manevra alanı dahil en az 20 m2'dir. Bu alan kamyon ve otobüslerin manevra alanı hariç en az 50 m2 olarak hesaplanmıştır. Manevra alanı ve şekli de dahil olmak üzere park alanları yerleşim planında veya kat planında gösterilmelidir. (madde4 ç bendi)

- İmar planı ve parselasyon planlarında imar parsellerinin büyüklüklerinin otopark yapımına imkan verecek şekilde belirlenmesi esastır. .(madde 4 bent d)

- Otopark yönetmeliğinin 9. maddesine göre daire metrekaresine göre ihtiyaç duyulan araç sayısı

Tablo 1. Mevzuata göre m2 için olması gereken otopark sayısı

1- Meskenler	80 m^2 altı her 3 daire için 1 adet 80 m^2 den 120 m^2 ye kadar (120 m^2 hariç) her 2 daire için 1 adet 120 m^2 den 180 m^2 ye kadar (180 m^2) hariç her daire için 1 adet 180 m^2 ve üzeri her daire için 2 adet
2- Ticari Amaçlı Binalar	
Dükkân, Mağaza, Banka	Her bağımsız bölüm için en az 1 adet olmak kaydıyla 40 m^2 için
Market, Süpermarket,	40 m^2 için
Alışveriş Merkezi	35 m^2 için
Büro Binaları	Her bağımsız bölüm için en az 1 adet olmak kaydıyla 50 m^2 için
Sauna ve Hamam	35 m^2 için

11- Sanayi, Depolama, Toptan Ticaret ve Endüstri Bölgeleri	
Sanayi ve Depolama Tesisleri, Toptan Ticaret	Her bağımsız bölüm için en az 1 adet olmak kaydıyla 200 m^2 için
Endüstri Bölgeleri	500 m^2 için

Katlara Göre Minimum Parsel Alanları Hesabı

➢ 5 katlı bir ayrık yapı nizamında minimum ölçüler:

'Parsel genişliği: Yan bahçeler toplamları+6m' 5 katlı yerlerde yan bahçeler en az 3.5 m olması gerektiğinden

Parsel genişliği:7m+6m=**13 m** minimum olması gereken parsel genişliğidir.

'Parsel derinliği=ön bahçe+13m' ön bahçelerde belediyesi yetkili olmak kaydıyla istisnai durumlar haricinde en az 5m alınır.

Parsel derinliği:5m+13m=**18 m** minimum olması gereken parsel derinliğidir.

Bu durumda 5 katlı ayrık yapı nizamı verilen yerlerde

Minimum parsel alanı= 18m*13m=234 m^2

➢ 5 katlı bir blok yapı nizamında minimum ölçüler:

'Parsel genişliği: Yan bahçe+6m' 5 katlı yerlerde yan bahçeler en az 3.5 m olması gerektiğinden

Parsel genişliği:3.5m+6m=**9.5 m** minimum olması gereken parsel genişliğidir.

'Parsel derinliği=ön bahçe+13m' ön bahçelerde belediyesi yetkili olmak kaydıyla istisnai durumlar haricinde en az 5m alınır.

Parsel derinliği:5m+13m=**18m** minimum olması gereken parsel derinliğidir.

Bu durumda 5 katlı blok yapı nizamı verilen yerlerde

Minimum parsel alanı= 18m*9.5m=171 m²

Hesaplanan metrekareler 5 kata imarlı yerler için minimum parsel alanlarıdır. Fakat imar durumu hesaba katıldığında bu metrekarelerin bina yapmak için elverişsiz olduğu ortaya çıkmıştır. Şöyle ki: 5 katlı ayrık yapı nizamlı parsel alanı minimum 234 m² hesaplanmıştır.

%30 imarlı olduğunu düşünsek kat başına 70 m² gibi küçük alana karşılık gelmektedir ki bu da bu parsel alanın bina yapmak için yeterli olmadığını gerçeğini ortaya çıkarır. O halde daire metrekarelerine göre min. ve max. parsel alanlarını hesaplayalım.

- Dairenin metrekaresi minimum 100 m² diye düşünürsek: her kat iki daire olan 5 kata imarlı parselin emsali 1000 m²'dir. %30 imarlı yerde minimum alanı 333 m² olur.
- Dairenin metrekaresi minimum 150 m² diye düşünürsek: her kat iki daire olan 5 kata imarlı parselin emsali 1500 m²'dir. %30 imarlı yerde minimum alanı 1000 m² olur.

O halde 333 m² ile 1000 m² arası parseller küçük parsel olarak tanımlanabilir. Bu parsel alan aralıklarında otopark çözümlerini inceleyelim.

3-Uygulama

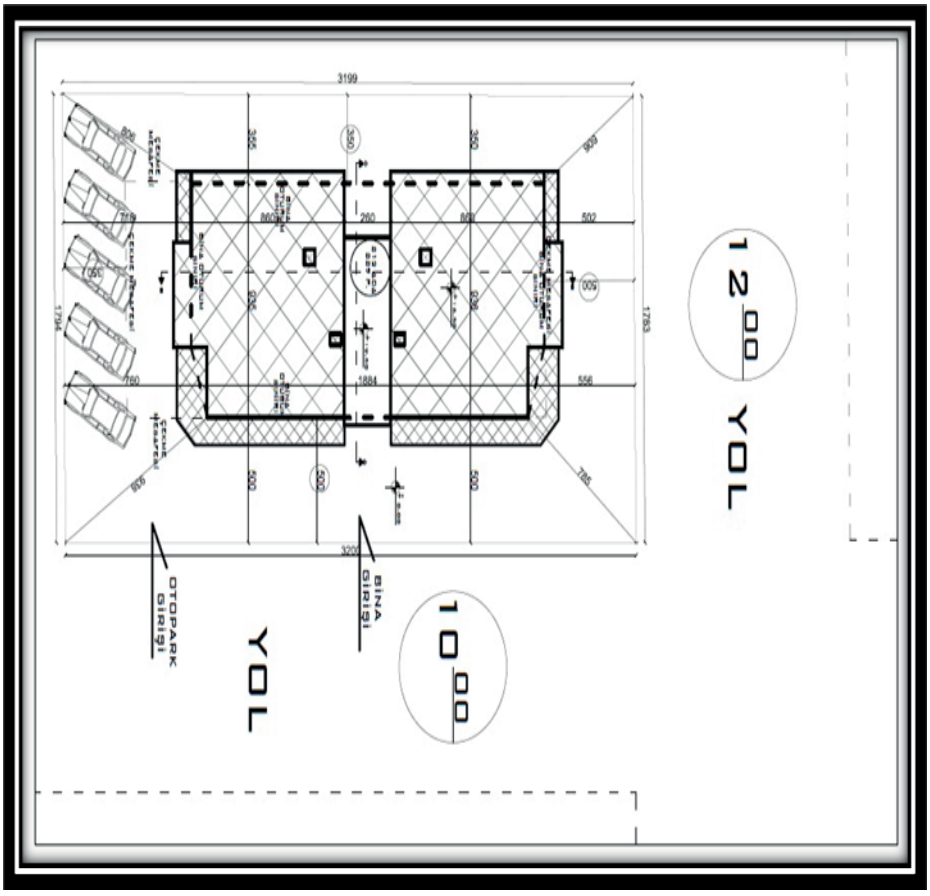
Araştırmaya öncelikle yapıların mimari projelerine ulaşarak başlanıldı. İncelenen mimari projelerde otopark yerleşimleri dikkate alındı. Binaların otopark çözümleri ele alındığında karşımıza şu sonuçlar çıkmıştır.

- ✓ Otoparkı bina dışında planlanan projeler
- ✓ Otoparkı bodrumda planlanan projeler
- ✓ Otoparkı zemin katta planlanan projeler

3-1 Otoparkı Bina Dışında Planlanan Projeler:

Otoparkı bina dışında planlanan projelerde: arsa alanına tip imar yönetmeliği ve ilgili belediyesinin ön koşullarına dikkate alınarak ön, arka ve yan

bahçe ölçüleri belirlenir ve bu belirlenen alan içine bina tasarımı yapılır. Bina tasarımı yapıldıktan sonra kalan alan bizim otopark, bina dışı sosyal donatı alanlarını vb tasarımızı etkiler. Parselimizin bina dışı kalan alanında araç park alanı ve araç dönüş hareketlerine en uygun yer belirlenerek otopark alanı tasarımı yapılır. Bu durumu örnekleyelim.



Şekil 3 vaziyet planı

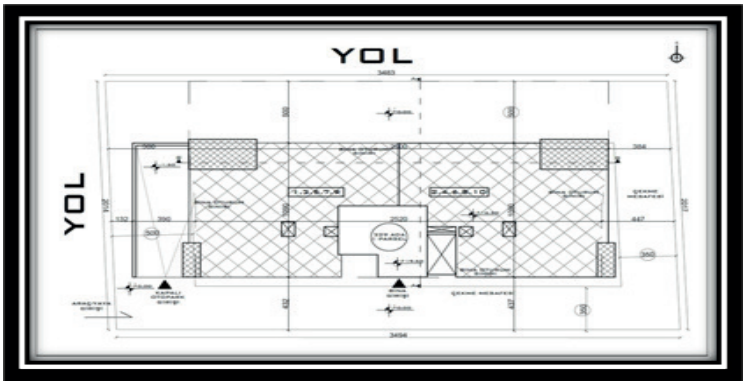


Şekil 4.Bina Dışı Otopark Çözümü Görseli

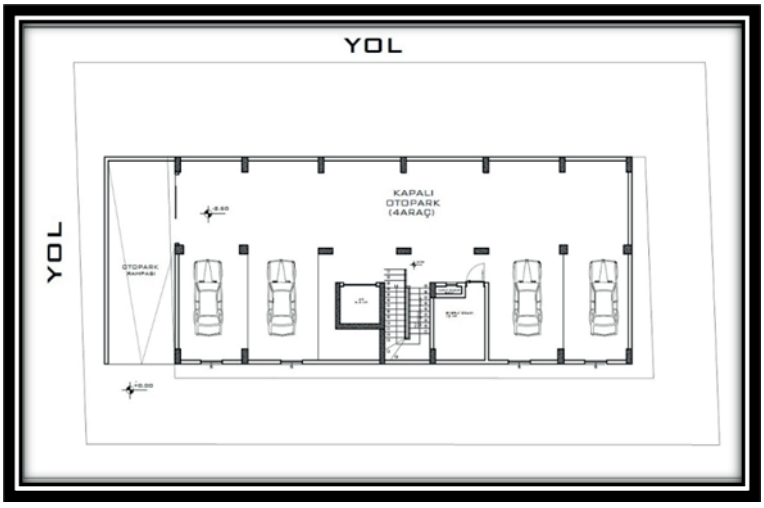
Örnekte 350 m² lik arsa alanına sahip köşe parseldir. İmar planında: yoğunluğu %30, ayrık nizam, kat adedi 5 ve lejantı konut alanıdır. Arsanın imar durumuna göre: yollardan 5m, yan parsellerden 3.5m çekme yapılarak binanın oturumu belirlenmiştir. Bu planlama çerçevesinde çekmelerden sonraki alanda bina tasarımı yapılmış her kat tek daire 105 m² olan toplamda 5 konut tasarlanmıştır. 25.03.2021 tarihinde yürürlüğe giren otopark yönetmeliğine göre brütte 80 m²-120 m²ye kadar her iki daire için bir otopark yeri bırakılması ön görülmüştür. Bu hesaba göre 5/2 den toplamda 3 otopark yeri bırakılması gerekmektedir. Vaziyet planında gösterildiği üzere yönetmeliğe göre otopark ihtiyacı karşılanmıştır.

3-2 Otoparkı Bodrumda Planlanan Projeler:

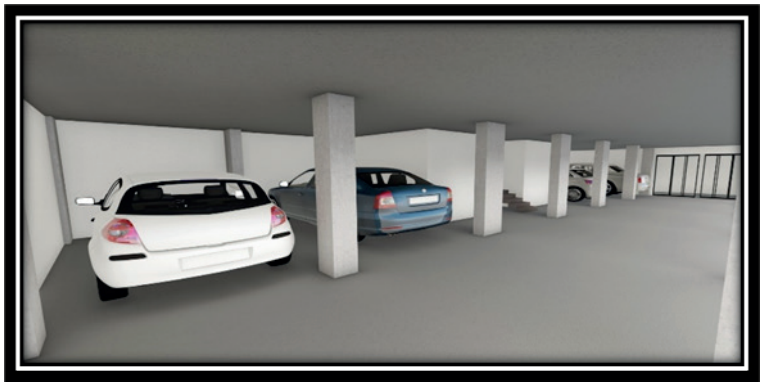
Otoparkı bodrumda planlanan projelerde: yine arsa alanına tip imar yönetmeliği ve ilgili belediyesinin ön koşullarına dikkate alınarak ön, arka ve yan bahçe ölçüleri belirlenir ve bu belirlenen alan içine bina tasarımı yapılır. Bina tasarımı yapıldıktan sonra araç otoparkına yer kalmadığı durumlarda yahut kalan alanı sosyal donatı alanı olarak kullanmak istenildiğinde otopark ihtiyacını bodrumda planlanır. Bu durumu örnekleyelim.



Şekil 5 Vaziyet Planı



a)



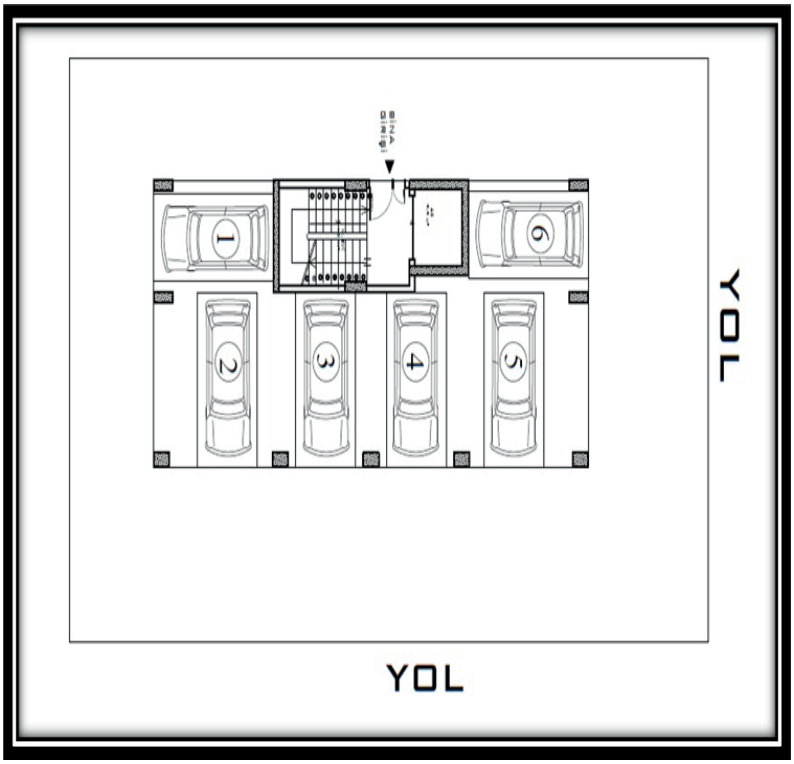
b)

Şekil 6 a-b Bodrum Katta Kapalı Otopark Çözümü

Örnekte vaziyet planı ve bodrum otopark planı incelenmiştir. Proje 595 m² lik arsa alanına sahip köşe parseldir. İmar planında: yoğunluğu %40, ayrık nizam, kat adedi 5 ve lejantı konut alanıdır. Arsanın imar durumuna göre: yollardan 5m, yan parsellerden 3.5m çekme yapılarak binanın oturumu belirlenmiştir. Bu planlama çerçevesinde çekmelerden sonraki alanda bina tasarımı yapılmış her kat iki daire ve 119 m² olan toplamda 10 konut tasarlanmıştır. 25.03.2021 tarihinde yürürlüğe giren otopark yönetmeliğine göre brütte 80 m²-120 m²ye kadar her iki daire için bir otopark yeri bırakılması ön görülmüştür. Bu hesaba göre 10/2 den toplamda 5 otopark yeri bırakılması gerekir. Proje incelendiğinde araç park alanı belirlenip, dönüş manevraları hesaplandığında ancak 4 araçlık yer planlanabilmiştir. Bu durumda binanın otopark ihtiyacı karşılanamamıştır.

3-3 Otoparkı Zemin Katta Planlanan Projeler:

Otoparkı zemin katta planlanan projelerde: yine arsa alanına tip imar yönetmeliği ve ilgili belediyesinin ön koşullarına dikkate alınarak ön, arka ve yan bahçe ölçüleri belirlenir ve bu belirlenen alan içine bina tasarımı yapılır. Bina tasarımı yapıldıktan sonra araç otoparkına yer kalmadığı durumlarda yahut kalan alanı sosyal donatı alanı olarak kullanmak istenildiğinde otopark ihtiyacı zemin katta planlanır. Bu durumu örnekleyelim.



a)



b)

Şekil 7 a-b Zemin Katta Otopark Çözümü

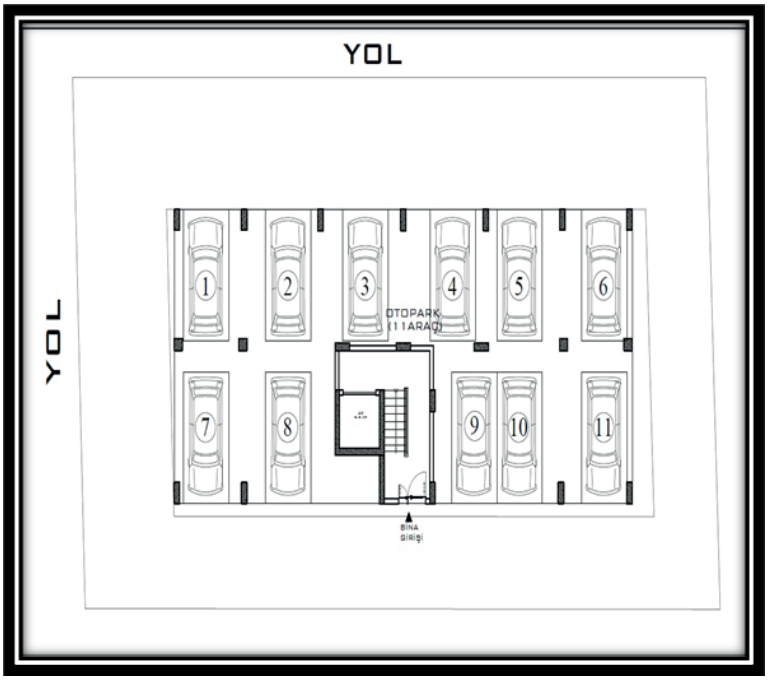
Proje 445 m² lik arsa alanına sahip köşe parseldir. İmar planında: yoğunluğu %30, ayrık nizam, kat adedi 5 ve lejantı konut alanıdır. Arsanın imar durumuna göre: yollardan 5m, yan parsellerden 3.5m çekme yapılarak binanın oturumu belirlenmiştir. Bu planlama çerçevesinde çekmelerden sonraki alanda bina tasarımı yapılmış her kat tek daire ve 133 m² olan toplamda 5 konut tasarlanmıştır. 25.03.2021 tarihinde yürürlüğe giren otopark yönetmeliğine göre brütte 120 m²-180 m²ye kadar daire için bir otopark yeri bırakılması ön görülmüştür. Bu hesaba göre toplamda 5 otopark yeri bırakılması gerekir. Proje incelendiğinde her daireye bir araç otopark yeri tahsisi sağlanmıştır.

4-Bulgu Ve Tartışmalar:

Araştırmalar sonucu gelişmiş ve gelişmekte olan il ve ilçelerde otopark alanlarında sıkıntılar tespit edilmiştir. Şehir merkezlerinde yaşanmaktan olan otopark problemlerinin yanı sıra bizim tez konumuz olan küçük parsellerde de otopark problemlerinin büyük oranda yaşandığı gözlemlendi. Bu problemin ortadan kaldırma ya da en aza indirme adına otopark tasarımları üzerinde hangisinin en ideal olabileceği üzerinde çalışmalar yapıldı. Bu bağlamda otopark tasarımlarının ne kadar önemli olduğu sonucuna varıldı. Tasarımı yapılan otoparkların hem estetik hem de mühendislik hesapları tasarımı etkileyen büyük bir kıstas oldu. Bunların yanı sıra yürürlükteki olan yönetmelikler de otopark tasarımında başrol oynayan kıstaslardan olduğu anlaşıldı.

Otopark çözümleri mümkünse bahçede çözümü yapılmış mümkün olmadığı durumlarda ise bodrum ya da zemin katta tasarlanmıştır. İncelenen projelerde parsellerin küçük olmasından dolayı da çok büyük oranda bina dışında otopark alanının ayrılamadığı gözlemlendi yani küçük parsellerde otopark çözümünün ya zemin katlarda ya da bodrumda yapılmaya elverişli

olduğu tespit edildi. Bu sebeple otoparkı bodrum da planlanan projeler ile otoparkı zemin katta planlanan projeleri karşılaştırmak adına aynı projede de iki durumu da inceleyelim. Böylelikle birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyalım.

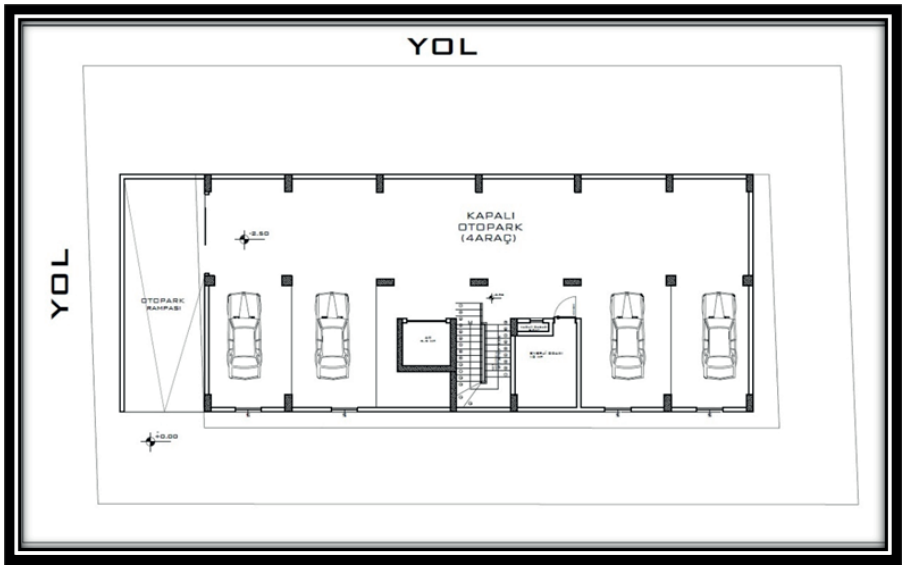


a)



b)

Şekil 8 a-b Zemin Katta Otopark Çözümü



a)



b)

Şekil 9 a-b Bodrum Katta Otopark Çözümü

Yukardaki iki planda aynı parsellerde farklı otopark planı çözümü incelenmiştir. Örnekteki proje 595 m² arsa alanına sahip köşe parseldir. İmar planında: yoğunluğu %40, ayrık nizam, kat adedi 5 ve lejantı konut alanıdır. Arsanın imar durumuna göre: yollardan 5m, yan parsellerden 3.5m çekme yapılarak binanın oturumu belirlenmiştir. Bu planlama çerçevesinde çekmelerden sonraki alanda bina tasarımı yapılmış her kat iki daire ve 119 m² olan toplamda 10 konut tasarlanmıştır. 25.03.2021 tarihinde yürürlüğe giren otopark yönetmeliğine göre brütte 80 m²-120 m²ye kadar her iki daire için bir

otopark yeri bırakılması ön görülmüştür. Bu hesaba göre 10/2 den toplamda 5 otopark yeri bırakılması gerekir.

Projeler incelendiğinde otoparkı bodrum katta planlanan projede sadece 4 araçlık otopark alanı ayrılabildiği görülmüş ve otopark ihtiyacının karşılanamadığı tespit edilmiştir. Ayrıca kapalı otoparkta rampaların dik olması ve bina içerisinde dönüş manevralarında zorluk yaşanması bodrum katta kapalı otopark çözümü elverişsizliği anlaşılmıştır. Otopark tasarımı zemin katta planlanan proje tasarımında ise 11 araçlık yer tahsisi yapılmış olup her dairenin otopark ihtiyacı karşılanması sağlanmış olup dönüş manevraları otoparkı bodrum kattaki çözüme göre daha iyi sonuçlar ortaya çıkmıştır.

5-Sonuç

Kent merkezlerinde ve yerleşim bölgelerinde otopark alanları çok büyük bir sorun teşkil etmektedir. Şehir merkezlerinde genellikle yol içine park yapılmakta, yol dışı otoparklarının teknik açıdan yetersiz kalmaktadır.

Yerleşim bölgelerindeki parsellerde ise: büyük parsellerde, otopark sorunun daha az yaşandığı yani parsel içinde otopark çözümlerinin yapıldığı apartman sakinlerinin araçlarını koyabileceği alanların oluşturulduğu sonucuna varıldı. Fakat küçük parsellerde aynı sonuçların olmadığı ve çoğu küçük parsellerde otopark alanına bahçede yerin ayrılamadığı gözlemlendi. Küçük parselde oturan apartman sakinlerinin bahçede araçlarını koyabilecekleri bir alan olmadığı için: araçlarını yol içi otoparka, bodrum katta yapılacak olan kapalı otoparka veya zemin katı otopark yaparak araçlarını park etmeleri zorunluğu olduğu ortaya çıktı.

Yol içi otoparkta: araçlar yol kenarına park edildiğinden caddede sıkışıklıklara, kötü görüntü oluşmasına sebebiyet vermekle birlikte aracın güvenliği açısından da tehlikeli olduğu sonucuna varıldı.

Bodrum katı otopark yapılan kapalı otoparklarda, kolon gibi taşıyıcıların ve binanın küçük bir oturumu olmasından dolayı aracın parkında, dönüş manevralarında ve rampa eğiminin dik bir şekilde inmeye zorlanması sonucunu doğurdu. Bu kadar olumsuzluklara rağmen apartman sakinlerinin otopark ihtiyacını karşılayamadığı sonucuna varılmıştır.

Zemin katı otopark olan otopark çözümlerinde ise: araç güvenliğinin sağlandığı, park yapma konforunun arttığı ve üstelik en önemlisi apartman sakinlerinin otopark ihtiyacının karşılandığı sonucuna varıldı.

Bu sonuçlar bağlamında küçük parsellerde otopark çözümleri ticari olmayan bölgelerde zemin katının otopark olarak kullanılması en etkili ve çözümcü sonuç olduğu örneklerle tespit edilmişti. Fakat bahçede ve bodrum katta yapılan otopark tasarımlarında KAKS'a dâhil edilmediği, zemin katta yapılan otopark tasarımlarında ise KAKS'a dâhil edildiği planlanan alanlar

yönetmeliğinde belirtilmiştir. Bu durum sonucunda otoparkın zemin katta olması inşaat emsalinden almış olacağından daire sayısında azalma ya da dairelerin metrekarelerinde küçülmelere neden olacaktır. Bu durum ne arsa sahibi ne de yüklenici firma tarafından istenmeyen bir sonuçtur. Bu durumun ortadan kalkması için ya yürürlükteki yönetmeliğin düzenlemesi ya da meclis kararlarıyla plan notlarına alınması ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR

Çay, R. D. (2020). Konut ve Site Alanlarında Otopark Tasarımı: Edirne Toki Hadımağa Konutları. Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(2), 75-85

Dönmez, Y., Özyavuz, M., & Gökyer, E. (2015). Safranbolu Kentinin Konut ve Site Alanlarının Yeşil Alan Durumlarının Saptanması. İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi, 5(11), 112.

Özyavuz, M., & Dönmez, Y. (2016). Konut ve Site Alanlarında Uygulanan Peyzaj Tasarımlarının Yeterliliği Üzerine Bir Araştırma: Tekirdağ Kenti. Düzce Üniversitesi Ormancılık Dergisi, 12(2), 108-122.

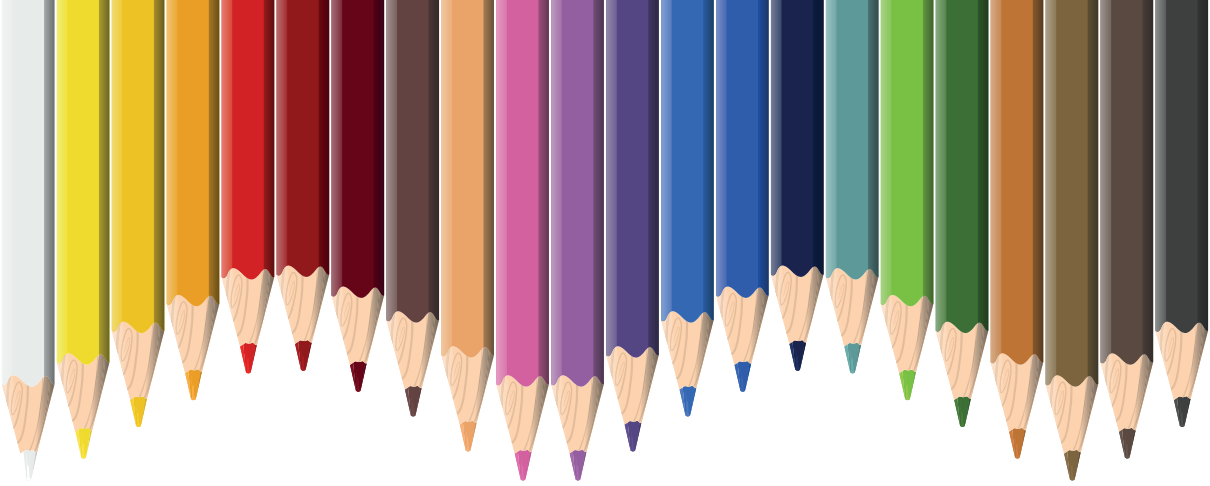
Şenbil, M., Yetişkul, E. (2016). İstanbul için Gece Parklanma Davranışları Modellemesi. İMO Teknik Dergi, Yazı 457, 75157532.

https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=24408&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5

https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=23722&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5

Url.1https://docplayer.biz.tr/23187104-Otopark-etudleri-prof-dr-mustafa-karasahin.html , erişim 22.12.2023

Yücedağ, C., Kaya, L. G., & Altunay, U. (2017). Burdur Kenti Toplu Konut ve Site Alanlarının Peyzaj Tasarım Yeterliliğinin İncelenmesi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8(2), 114-122.



Bölüm 9

DEPREMLER SIRASINDA GÖRÜLEN YANAL ZEMİN DEFORMASYONLARININ BELİRLENMESİ

Hüseyin Suha Aksoy[1]
Aykut Özpolat[2]

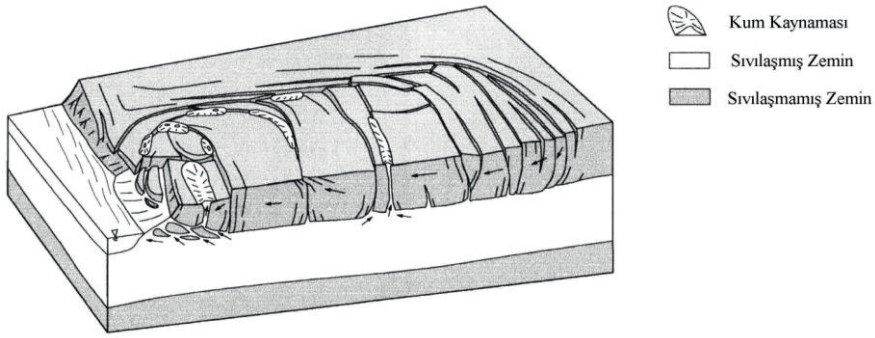
1 H.Suha Aksoy, Doç.Dr., Fırat Üni. Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl. Orcid No: 0000-0003-0564-457X
2 Aykut Özpolat, Dr.Öğr. Üyesi, Fırat Üni. Tek. Fak. İnşaat Müh. Böl.,Orcid No: 0000-0003-4028-6261

1. Giriş

Gökçe ve diğerlerine (2008) göre afetler, insanların sosyal etkileşimlerini bozan, sosyal, ekonomik ve çevresel zararlara yol açan teknik veya doğal felaketler olarak tanımlanmaktadır. Ülkemiz, jeolojik ve jeomorfolojik yapısı ve iklimsel özellikleri nedeniyle önemli can ve mal kayıplarına yol açan doğal afetleri sıklıkla yaşamaktadır. Önemli ölçüde mal ve can kaybına neden olan bu doğal afetler arasında depremler ilk sırada yer almaktadır.

Bölgesel zemin özelliklerinin depremlerin neden olduğu yapısal hasarda önemli bir rol oynadığı artık yadsınamaz bir gerçektir. Yerel zemin koşulları ya depremlerin özelliklerini değiştirmekte ya da yerel zemin nitelikleri depremlerden olumsuz etkilenmektedir. Suya doymuş kumlar en olumsuz etkilenen zemin türüdür. Sıvılaşmanın neden olduğu hasar türlerinden biri, hafif eğimli arazilerde görülen yatay yer değiştirmelerle karakterize edilen yanal yayılmadır (Kaya, 2008). Sıvılaşma, sismik hareket sırasında zeminin en alt kısımlarındaki boşluk suyu basıncının artmasıyla meydana gelir. Depremler sırasında yanal yayılmanın nedeni, yüzeye yakın büyük, sığ zemin bloklarındaki sıvılaşmaya bağlanabilir. Şev eğimi yönündeki yatay yer değiştirmeler neticesinde zemin yüzeyinde şev eğimine paralel şekilde kabarmalar görülür.

Sıvılaşma olduğunda, üst kısımdaki doymamış zeminler, alt tabakalardaki sıvılaşmış tabakanın üzerine büyük bir kuvvetle çöker. Bu şekilde, sıvılaşma sona erdiğinde, zemin kaymaya devam eder ve yarıklar ve kaymalar nehirler, okyanuslar ve göller gibi yerlere doğru hareket eder (Şekil 1.1). Yanal yayılmanın gerçekleşmesi için düşük eğimli araziler, yüzeye yakın bir yeraltı suyu tabakası ve sıvılaşabilir kohezyonsuz zeminler gereklidir. Kayma hareketi nedeniyle zeminde eğim yönünün tersine doğru ilerleyen çatlaklar ve yarıklar oluşur.

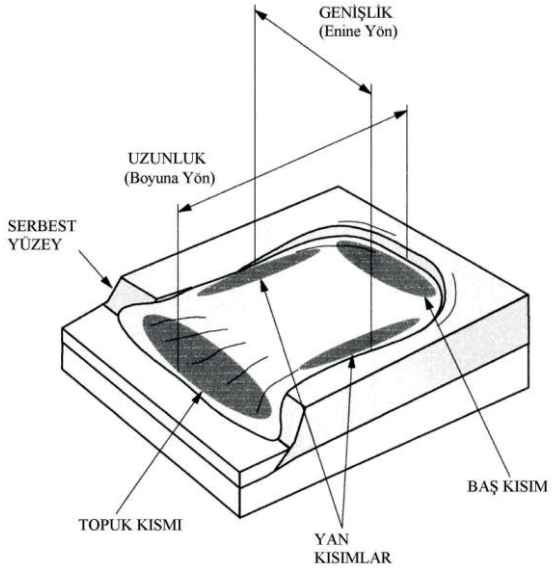


Şekil 1.1. Sıvılaşma Kaynaklı Yanal Yayılma (Orijinal:Varnes, 1978; Kaynak: Kaya, 2008)

Varnes'e (1978) göre, yanal yayılma, toprak tabakasının altındaki zeminlerin sıvılaşması veya hareket etmesi sonucunda zeminin uzaması ve kırılması şeklinde olabilir. Bu zeminlerin üst sağlam birimleri kademeli olarak dibe inebilir, hareket edebilir, dönebilir veya parçalanabilir. Hatta sıvılaşabilir veya akabilirler. Zeminlerin dönmesi ve ötelenmesi sadece iki olası kırılma mekanizmasıdır; diğer bir kırılma mekanizması ise akıştır. (Rauch, 1997). Housner (1985) sıvılaşma sonucunu, toprak kırıkları ve kum kaynamaları ile ilişkili yüzey altı katmanlarında sıklıkla gözlenen, yüzeysel zemin bloklarının önemli ölçüde yanal yer değiştirmesi olarak tanımlamaktadır. Aşağıya doğru hareket eden kaymalar veya yüksek eğimli yamaçların altındaki küçük sıvılaşma, tamamen kopmuş zemin kütlesinin oldukça uzun bir mesafe boyunca akmasına neden olabilir. Kaya (2008), sıvılaşmayı oluşturan kısımları Şekil 1.2 deki gibi tanımlamıştır.

Bartlett ve Youd'a (1992a, 1992b) göre, yüzeye yakın yeraltı suyu seviyeleri ve %0,3 ila 5'lik hafif eğimler sıvılaşmanın neden olduğu yanal yayılma için ideal koşullardır. Güçlü depremler sırasında, bu tür zemin katmanları boşluk suyu basıncı geliştirme, yumuşama ve sıvılaşma eğilimindedir. Sıvılaşma gerçekleşirse, doymamış örtü zemini, dağılmamış bloklar gibi altındaki sıvılaşmış zemin tabakası üzerinde kayabilir. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi, yüzey yer değiştirmeleri güçlü eğimli bir yüzey (nehir kıyısı gibi) yönünde ilerledikçe yarıklar, eğimler ve hendekler ortaya çıkar. Düşük yüzey eğimleri, yüzeye yakın yeraltı suyu seviyeleri ve yeni oluşmuş alüvyonlu toprak katmanları, gevşek yerleşimli doymuş kumlu tortular ve kıyı veya nehir sınırları yanal yayılmayı destekleyen jeolojik özelliklere örnektir (Kokusho ve Fujita, 2002).

Düz yüzeyli bir zeminin yanal deformasyonları iki ihtimale bağlıdır: birincisi, zemin sıvılaşması nedeniyle deformasyona maruz kalabilir, ancak sıvılaşmış katmanın tabanı eğimli olabilir; İkincisi taban hafif eğimli olmasına rağmen, zemin sabit kalabilir, bu durumu açıklamak için sadece eğim yeterli olmayabilir (Sasaki vd., 1992).



Şekil 1.2. Yanal Yayılmayı Oluşturan Bölgeler (Kaya, 2008)

Yanal yayılma, çok küçük bir değerden metrelerce büyüklüğe kadar değişen yatay yer değiştirmelerle sonuçlanabilir. Kaymanın başındaki gerilme çatlakları veya zemin çatlakları genellikle yamaç hareketinin yönüne paraleldir. Ayrıca, zemin çatlaklarının çoğu kayma bölgesinin üst sınırı etrafında bulunur ve topuk kabarması yanal yayılmanın başında çökmeye neden olur. Yanal yayılmanın daha küçük kısımları sıklıkla zemin sıvılaşmasının yaygın bir göstergesi olan kum kaynama olayıdır.

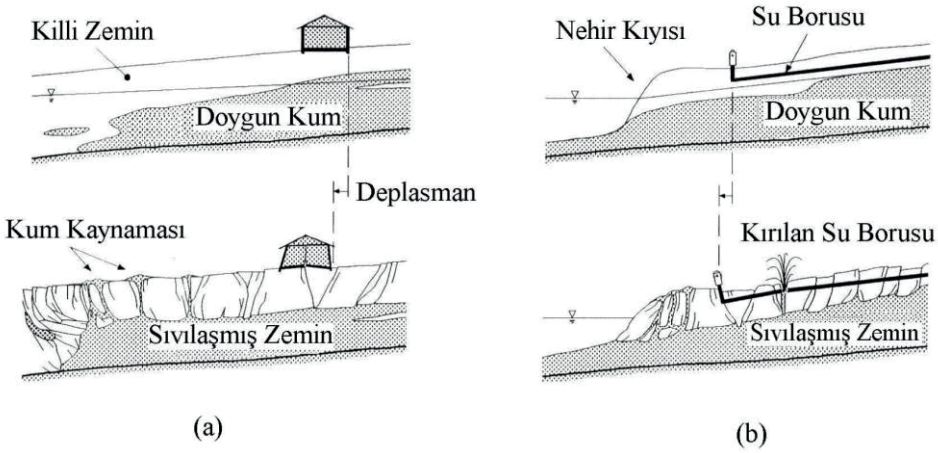
İvmenin deformasyonlar üzerinde fazla bir etkisi yoktur. Boşluk suyu basıncı oluşumu ivmenin büyüklüğüne bağlıdır. Ayrıca, yüksek boşluk suyu basıncının uzunluğu depremin süresi ile ilişkilidir. Sarsma tablası deneyinde numunede, yer değiştirmeler doğrudan ivmeden etkileniyorsa bu doğrultuda deformasyonlar göstermelidir; ancak yer değiştirmeler doğrudan statik yerçekiminden etkileniyorsa radyal hareketler beklenir. Eğim yönünde döngü sayısı arttıkça kalıcı deformasyonlar da artar (Sasaki vd. 1992).

2. Yanal Yayılmanın Yapılar üzerindeki etkisi

Tekrarlanan yükler nedeniyle zeminin sıvılaşması sonucunda dolgular çöker ve istinat duvarları eğilir; bu tür çökmeler deprem hasar durumunda sıklıkla yanal yayılma olarak adlandırılır. Örneğin, şev yüzeyine paralel uzanan oturmalar, yanal yer değiştirmeler ve yüzey çatlakları sıvılaşabilir zeminler üzerine inşa edilen karayolu ve demiryolu dolgularına zarar verebilir. Ayrıca, sıklıkla yanal yayılma olarak adlandırılan duvar arkasındaki zemin deformasyonları, temel zeminlerinin veya dolgunun sıvılaşması sonucunda istinat duvarının dışa doğru hareketinin nedenidir (Ishihara, 1996). Rıhtım duvarlarının arkasındaki gevşek, suyla ıslanmış dolguların sıvılaşması, yanal olarak uzamalarına ve duvarlara zarar vermelerine neden olabilir.

Binalar ve hizmet tesisleri, birkaç metreye kadar yanal yayılma ile yatay yer değiştirmelerden önemli hasarlar görebilir. Kaymanın baş kısmına yakın yapılar zaman zaman ters yönde itilebilirken, kaymanın topuk kısmındakiler alttaki toprağın baskısına veya eğilmesine maruz kalırlar. Yapılar büyük yer hareketleri nedeniyle yıkılabilir, ancak daha küçük yatay ve dikey yer değiştirmeler bile onlara ciddi zarar verebilir.

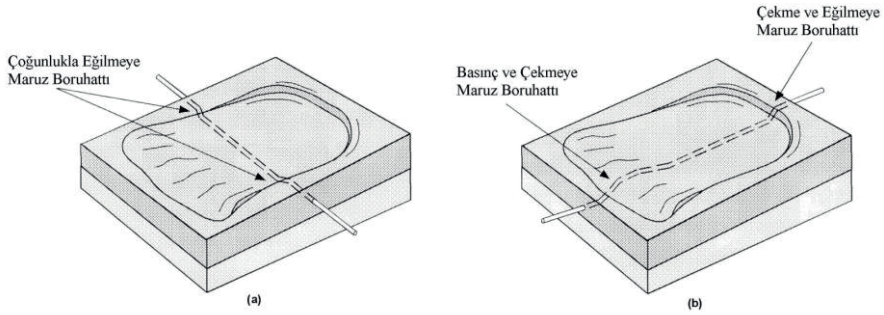
Bartlett ve Youd'a (1992a, 1992b) göre, yüzeye yakın yeraltı suyu seviyeleri ve %0,3 ila 5'lik hafif eğimler sıvılaşmanın neden olduğu yanal yayılma için ideal koşullardır. Güçlü depremler sırasında, bu tür zemin katmanları boşluk suyu basıncı geliştirme, yumuşama ve sıvılaşma eğilimindedir. Sıvılaşma gerçekleşirse, doymamış örtü zemini, dağılmamış bloklar gibi altındaki sıvılaşmış zemin tabakası üzerinde kayabilir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, yüzey yer değiştirmeleri güçlü eğimli bir yüzey (nehir kıyısı gibi) yönünde ilerledikçe yarıklar, eğimler ve hendekler ortaya çıkar. Düşük yüzey eğimleri, yüzeye yakın yeraltı suyu seviyeleri ve yeni oluşmuş alüvyonlu toprak katmanları, gevşek yerleşimli doymuş kumlu tortular ve kıyı veya nehir sınırları yanal yayılmayı destekleyen jeolojik özelliklere örnektir (Kokusho ve Fujita, 2002).



Şekil 2.1. (a). Az Eğimli Zeminlerin, (b). Yamaca Doğru Olan ZeminlerinYanal Yayılması ve Sıvılaşması (Rauch, 1997)

Depremlerden sonra, yanal yayılma elektrik direkleri gibi yapılarda hasara neden olabilir. Bu yapılar sıklıkla yeraltı yapıları (yaşam hatları) olarak adlandırılır. Bir deprem durumunda, bu yeraltı yapılarının normal şekilde çalışmaya devam edeceği öngörülmektedir. Tekil yanal yayılmalar son derece geniş alanlarda gerçekleşebildiğinden, yeraltı kamu hizmeti hatları ve ulaşım yolları üzerinde birden fazla yerde etkili olabilirler. O'Rourke ve Lane'e (1989) göre, iletim hatları yanal yayılma nedeniyle sıklıkla ciddi şekilde kesintiye uğramaktadır. Çünkü:

1. Önemli depremlerin oluştuğu bölgelerde sıklıkla yanal yayılma görülür.
2. Yanal yayılma, olası risklerin tanımlanmadığı hafif eğimli, stabil yamaçlarda gerçekleşir.
3. Hassas olarak belirlenmiş alanlarda bile zemin deformasyonu ve ardından gerçekleşecek yanal yayılma gelişimini tahmin etmek zor olabilir.
4. Sıvılaşmamış yüzey zemin bloklarının hareketi, yeraltı boru hatlarına büyük yükler uygulamaktadır.



Şekil 2.2. Boru Hatlarına Paralel ve Dik Oluşan Yanal Yayılma Durumunda Meydana Gelen Hasarlar (O'Rourke ve Lane, 1989)

Yanal yayılmanın yeraltı boruları üzerindeki etkisini değerlendirirken, yer değiştirmelerin boyutu, deformasyonların şekli ve deformasyonların yönü gibi tasarım faktörleri çok önemlidir. Şekil 2.2, boruya iletilen yüklerin özelliklerini etkileyen yanal yayılma yönlerini göstermektedir. Yanal yayılmaya dik olan (Şekil 2.2.a) ve bu nedenle bükülmeye karşı hassas olan bir boru için yer değiştirme miktarı en önemli tasarım konusudur. Yanal yayılmaya paralel olan bir boru hattına (Şekil 2.2.b) yer hareketleri tarafından eksenel sürtünme kuvvetleri uygulanır. Bunun nedeni, nispeten küçük hareketlerin birim uzunluk başına en yüksek sürtünme kuvvetlerini harekete geçirmesidir.

Yanal yayılmanın yeraltı borularını nasıl etkileyeceğini değerlendirirken, yer değiştirmelerin boyutunu, deformasyonların şeklini ve deformasyonların yönünü dikkate almak önemlidir. Şekil 2.2.'de, özellikleri bakımından boruya uygulanan yükleri etkileyen yanal yayılma yönlerini görülmektedir. Zemin yer değiştirme derecesi, yanal yayılmaya dik olan bir boru için kilit tasarım unsurudur (Şekil 2.2.a).

Eksenel sürtünme kuvvetleri, yanal yayılmaya paralel olan bir boru hattına zemin titreşimleri yoluyla iletilir (Şekil 2.2b). Bunun nedeni, birim uzunluk başına en büyük sürtünme kuvvetlerini harekete geçiren şeyin nispeten küçük hareketler olmasıdır.

3. Yanal Yayılma Deplasmanlarını Tahmin Etmek İçin Yöntemler

Yanal yayılma nedeniyle oluşan deplasmanların tahmini için aşağıdaki yöntemler tercih edilmektedir.

1. Bünye modelleri (Sonlu eleman modelleri, FEM)

2. Basit analitik modeller
3. Ampirik modeller
4. Fiziksel modeller

Çok sayıda karmaşık mekanik ve değişken unsurun etkileşimi yanal yayılmaya neden olur. Örneğin, hem statik hem de dinamik yüklerin söz konusu olduğu depremler sırasında deformasyonlar meydana gelir. Ancak, sismik taban hareketleri durduktan sonra da hareketler devam edebilir. Bartlett ve Youd'a (1992b) göre dört parametre yer değiştirmelerin büyüklüğünü yönetmektedir.

1. Sıvılaşmış zemindeki kayma mukavemetinin derecesi
2. Kayma etrafında sınır şartları
3. Hareket eden zemin kütlesi üzerinde etkili olan statik ve dinamik kayma kuvvetleri
4. Kaydıran kuvvetlerin karşı koyan kuvvetleri aştığı zamanın uzunluğu

Yanal yayılma problemleri söz konusu olduğunda, sonlu elemanlar veya benzer bir hesap yöntemi kullanan sayısal modeller, özellikle düzensiz geometrinin etkisini hesaba katma konusunda çok hassastır. Gerçekte, yanal yayılma deformasyon miktarları, temel analitik modeller kullanıldığında bazı durumlarda sahadaki değerlerden büyük olarak hesaplandığı gözlemlenmiştir.

Gerçekte, sıvılaşma yer değiştirmelerini tahmin etmek için uygulamada hala ampirik teknikler kullanılmaktadır (Glaser, 1994). Bununla birlikte, en iyi ampirik yanal yayılma modelleri, zemin yer değiştirmelerinin yalnızca kaba tahminlerini sunabilir.

Fiziksel modeller ile, santrifüj veya sarsma tablasından elde edilen bilgileri kullanarak yanal yayılma simüle edilmeye çalışılmıştır. Bu model testleri, zemin sıvılaşması sırasında ve sonrasında zemin davranışı hakkında önemli ayrıntılar ortaya koymuştur.

3.1. Bünye Modelleri (Sonlu Eleman Modeller, FEM)

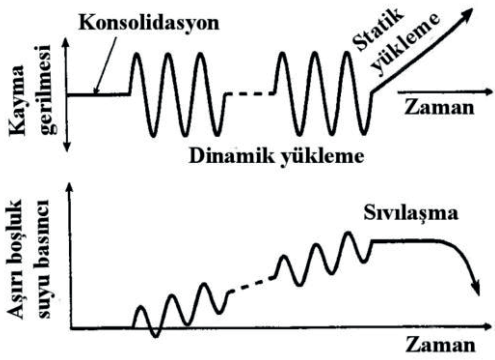
Sonlu elemanlar ve sonlu farklar yaklaşımlarını kullanan birçok araştırmacı, sıvılaşmanın başlamasının ardından meydana gelen büyük yer değiştirmeleri bünye modelleri ile tahmin etmiştir. Bu simülasyonların çoğunda küçük şekil değiştirme formülleri kullanılmıştır. Yanal yayılma sırasında önemli kayma deformasyonları söz konusu olduğunda, bunların gerçekle uyumlu

olmadıkları bilinmektedir. Bu modelleri santrifüj ve sarsma masası deneyleri ve diğer somut model deneyleriyle desteklemek için çalışmalar mevcuttur.

Sonlu eleman yöntemleri, bir zemin kütlesinin deformasyonunu içeren konularla uğraşırken mekanik ve sınır koşullarına bağlı modeller için genellikle uygundur. Ancak yanal yayılmanın ve sıvılaşmanın her senaryosunu hesaba katan çok doğru bir model sağlamak için son derece karmaşık bir sonlu eleman modeline ihtiyaç vardır. Hassas bir sonlu eleman modeli, sismik hareketleri doğru bir şekilde modellemek için çeşitli faktörleri hesaba katmalıdır. Bunlar arasında aşırı boşluk suyu basıncının birikmesinden kaynaklanan zemin yumuşaması, zemin sıvılaştıkça hızlı kayma mukavemeti kaybı, sıvılaşmış zemin katmanlarının aşırı bozulması, kırıkların potansiyel olarak devam etmesi, dinamik yükleme sona erdikten sonra devam eden deformasyonlar ve aşırı boşluk suyu basınçları tahliye edildikçe yeniden konsolidasyon yer alır.

Kalıcı deformasyonlar Yasuda ve diğerleri (1991a, 1992a) tarafından sıvılaşmış zeminde kayma direnci ve kayma modülünün düşürülmesi kullanılarak hesaplanmıştır. Sıvılaşma sırasında kayma modülündeki değişimi tespit etmek için veyn ve dinamik burulma kayma deneyleri yapmışlardır. Veyn kayma deneyi sonuçları, sıvılaşmanın 1/200 ila 1/400 arasında değişen bir kayma modülü azalmasına neden olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni sıvılaşma sırasında zeminin akışkan bir yapıya sahip olmasıdır. Sıvılaşma öncesi durumdaki statik kesme kuvvetlerinin, sıvılaşma sonucu yumuşamanın getirdiği uzun vadeli deformasyonlara neden olduğu düşünülmektedir. İlk olarak, zemin kesitindeki gerilmeleri belirlemek için kurduğu modelde sıvılaşma öncesi elastik modüller kullanarak sonlu elemanlar yaklaşımını ile hesap yapmıştır. Doğada zemin katmanları tek bir adımda oluşmadığı için hesaplamadaki model katmanlarının birden fazla adımda oluşturulması gerekmektedir. İkinci olarak, gerilmeler sabit alınarak azaltılmış elastisite modülleri kullanılmış ve sonlu elemanlar analizleri yeniden gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, kalıcı deformasyon derecesi iki inceleme arasındaki deformasyon farklılıkları karşılaştırılarak belirlenmiştir. Bu analizler aşağıdaki değerleri kabul etmiştir: Dolgu boyunca sıvılaşma nedeniyle elastisite modülündeki azalma oranı (E/E_o) 0.35, 0.499 ve 1/1000,. E=28N formülü kullanılarak, bu incelemelerde SPT-N değerlerine dayalı olarak Young modülü (E) hesaplanmıştır. Sıvılaşmış zemini tasvir etmek için uygun bir rijitlik azaltımı bulmak analizin ana hedefidir.

Yasuda ve diğerleri (1999) ilk çalışmalarını geliştirerek ikinci bir çalışma yapmışlardır. Bilim adamları, sıvılaşma kaynaklı önemli deformasyonları değerlendirmek için basit bir teknik oluşturmuşlardır. Oluşturulan tekniğe ALID ya da Sıvılaşma Kaynaklı Deformasyon Analizi adı verilmiştir. Araştırmacılar bu stratejiyi kullanarak, azalan kayma modülünün sıvılaşmış toprakta artık deformasyona neden olacağını öngörmektedir. Dinamik yükleme döngülerinin genliği veya miktarı tarafından düzenlenen sıvılaşma derecesi, sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü ile gösterilir. Dinamik yüklemeyi takiben çok yüksek hızlarda dakikada γ=%10 deformasyon ile drenajsız ortamlarda statik çalışmalar yapmışlardır (Şekil 3.1).

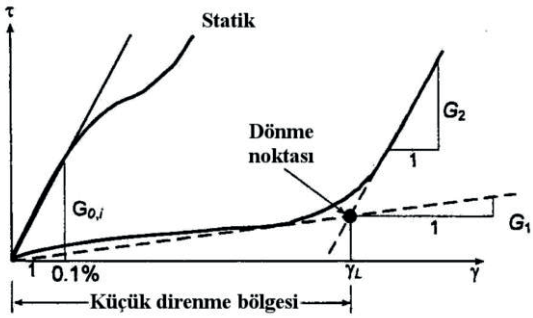


Şekil 3.1. Statik ve Dinamik Yükleme Yöntemi (Yasuda ve diğ., 1999)

Referans deformasyon (γ_L), direnç dönüşüm noktasına kadar olan deformasyondur (Şekil 3.2). G_1, G_2 ve γ_L 'yi kullanan bilineer model, referans dönüşüm noktasından önceki ve sonraki gerilme-gerinim eğrilerini kabaca tasvir edebilir:

$$\tau = G_1 * \gamma \qquad \gamma < \gamma_L \qquad (3.1)$$

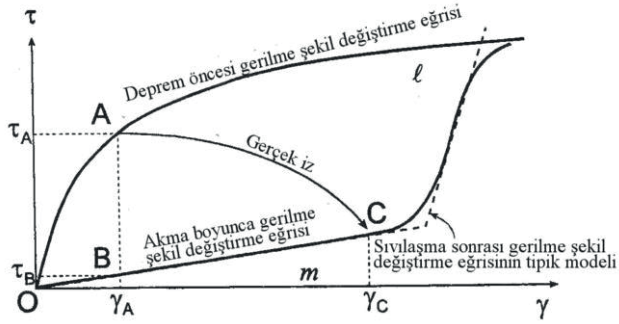
$$\tau = G_1 * \gamma_L + G_2 (\gamma - \gamma_L) \qquad \gamma \geq \gamma_L \qquad (3.2)$$



Şekil 3.2. G_{oi}, G_1,G_2 ve γ_L'in Grafik Gösterimi (Yasuda ve diğ., 1999).

G_1, G_2 sırasıyla referans gerilmeden önceki ve sonraki kayma modülleridir. Sıvılaşmanın neden olduğu kayma modülündeki azalmayı belirlemek için sıvılaşma öncesi ve sonrası kayma modüllerinin oranını, G_1/G_0, belirlemişlerdir. G_0 için iki farklı değer seçilmiştir: birincisi Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin sekant modülü, $G_{0,i}$, dinamik yükleme öncesinde g=%0,1 alarak belirlenir ($\Delta u/\sigma_v' = 0$). İkincisi G_N=28N Formülü ile, SPT-N değerinden elde edilmiştir.

Şekil 3.3 sıvılaşma kaynaklı deformasyonlar için önerilen yöntemde kullanılan gerilme-şekil değiştirme eğrisini göstermektedir. Bu grafikte ℓ eğrisi depremin başlangıcındaki omurga eğrisini temsil etmektedir. Şekil 3.3'deki A noktası, tabakadaki bir zemin elemanının başlangıç durumu olarak kabul edilmektedir. Boşluk suyu basıncı arttığında, elastisite modülü ve kayma mukavemeti gibi zemin parametreleri değişir. Sıvılaşma nedeniyle, omurga eğrisi ℓ'den m'ye yönelir, daha sonra deformasyon artar. Burada, γ_C-γ_A, zemin özelliklerindeki değişimin getirdiği deformasyon artışıdır. Zemin akışı, resimdeki C noktasının gösterdiği gibi, zeminin nitelikleri yeni uygulanan, değişen gerilmeleri dengelediğinde sona erer. Gerçek iz A'dan C'ye doğru iken, bu yaklaşımda iki iz vardır: 1. A'dan C'ye B üzerinden giden ve 2. O'dan C'ye B üzerinden geçen sıvılaşma kaynaklı deformasyonu araştırmak için iki iz varsayarak iki yaklaşım kullanmışlardır.



Şekil 3.3. Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi (Yasuda vediğ., 1999)

Gerilme gevşemesi yönteminde, gerilme-şekil değiştirme eğrisi (ℓ) kullanılarak, deprem öncesi durum sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak belirlenir. Daha sonra, gerilme tutularak, gerilme-şekil değiştirme eğrisi m yönünde kaydırılır. Devam eden gerilim nedeniyle, iç ve dış gerilmeler bu noktada dengesizdir. Bu nedenle, dengesiz gerilimleri azaltmak zorunludur. Zeminin sıvılaşma kaynaklı deformasyonunu ve gevşeme fazı sırasındaki deformasyon artışını (γ_C-γ_A) hesaplamak mümkündür (Yasuda vd., 1999). İkincisi ise öz ağırlık yöntemi (self weight method) olup gerilme gevşemesi yönteminde olduğu gibi ℓ gerilme şekil değiştirme eğrisi kullanılarak FEM ile zemin deformasyonları belirlenir. Ardından yerçekimi kuvveti, bir kez daha m gerilme-şekil değiştirme eğrisi yardımıyla aynı modele uygulanır. Sıvılaşmadan kaynaklanan akmadan dolayı şekil değiştirme, 2. durumdan 1. duruma geçen şekil değiştirme sonucuyla değerlendirilir. Gerilme gevşemesi yönteminin herhangi bir gerilme-şekil değiştirme eğrisinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ancak, diğer FEM kodlarından ayırt edilebilmesi için özel olarak modifiye edilmesi gerekmektedir. Rastgele bir FEM programı kullanılabilmesine rağmen, öz ağırlık tekniğinin kayan kuvvetlerin dalgalanmasını hesaba katmadığını iddia etmişlerdir (Yasuda ve diğ., 1999).

3.2 Basitleştirilmiş Analitik Modeller

Bu bölümde, yanal yayılmada zemin deformasyonlarını hesaplamak için analitik olarak basit iki yaklaşım incelenmektedir. Hesaplamaların

temelini oluşturan Newmark'ın kayan blok modeli, sismik taban ivmesinin şev deformasyonlarına neden olduğu varsayımını yapar. Bununla birlikte, sıvılaşma gerçekleştikten sonra, Towhata'nın tekniğinde tüm deformasyonlar statik yüklerden kaynaklanır.

3.2.1. Newmark'ın kayan blok modeli

Newmark (1965) tarafından depremler sırasında şev kaymalarının pratik tahmini için kayan blok benzeri bir teknik ortaya konmuştur. Makdisi ve Seed (1978), Ulusal Araştırma Konseyi (Housner, 1985) ve Jibson (1993) gibi birçok araştırmacı Newmark'ın tekniğini benimsemiş ve yaygın olarak kullanmıştır.

Newmark modeli gibi analizler zeminin kayma mukavemetinin deprem boyunca sabit kaldığını varsaydığından, zemin sıvılaşmasının neden olduğu zemin deformasyonlarını simüle etmek için kullanılamazlar. Öte yandan, sıvılaşma hasarları Baziar ve diğerleri (1992) ve Byrne ve diğerleri (1992) tarafından aşağıda açıklandığı üzere Newmark analojisi kullanılarak modellenmeye çalışılmıştır.

Şekil 3.4, yatay taban hareketleri altında sürtünme düzleminde kayan bir kütlenin Newmark analojisini göstermektedir (Rauch, 1997). Bloğun eğilimi, iç kuvvetler nedeniyle taban ivmesinin ters yönünde hareket etmektir. Ancak sadece statik ve dinamik kayma kuvvetlerinin toplam kuvveti, karşıt kuvvetlerin kuvvetinden daha büyük olduğunda blok tabana göre hareket etmeye başlayacaktır. Bu denge koşulları, blok kaymaya başladığında bir akma ivmesi (a_y) cinsinden temsil edilir. Başka bir deyişle, akma ivmesi (a_y veya k_y) kayan kütle ile alttaki zemin arasındaki veya blok ile düzlem arasındaki kesme direncini ifade eder. Taban ivmesi kaydının çift entegrasyonu (Şekil 3.4), belirli bir akma ivmesi için tüm kümülatif yer değiştirmeyi verir. Taban ivmesi akma değerinden büyük olduğunda blok kayma hızı ilk integral tarafından belirlenir. Temel ivme yön değiştirdiğinde maksimum değere ulaşır ve sonuç olarak hız sıfıra düşer. Akma ivmesinin aşıldığı her bir ilerleme boyunca yer değiştirmeler, hız kaydının ikinci integrali tarafından sağlanır.

Akma ivmesi, Şekil 3.4'de gösterildiği gibi eğim açısı ve kaymaya karşı statik güvenlik faktörü cinsinden ifade edilir. Kayma yüzeyi eğimli ise, yukarı eğim hareketi için a_y, aşağı eğim hareketi için olan değerden daha

büyüktür. Şekil 3.4'deki tüm yer değiştirmeler yamaç aşağıdır ve yamaç yukarı akma ivmesi hiçbir zaman aşılmaz. Akma ivmesi, zeminin eğimi dikkate alındığında zeminin kayma mukavemetinin ve kayma yüzeyinin veya göçme mekanizmasının bir fonksiyonu olarak hesaplanır. Standart Newmark analizinde kaymanın rijit, mükemmel plastik davranışa sahip olduğu ve akma ivmesinin yer değiştirmeden bağımsız olduğu kabul edilir.

Jibson (1993), sarsıntı şiddetini temsil eden Arias şiddeti ($I_a = [\pi / 2g] \int a^2 dt$) ile Newmark tipi analiz kullanarak yer değiştirmeleri tahmin etmek için bir bağıntı kurmuştur.

$$\log D = 1.460 \log I_a - 6.642 a_y + 1.546 \quad (3.3)$$

$$I_a = [\pi / 2g] \int a^2 dt \quad (3.4)$$

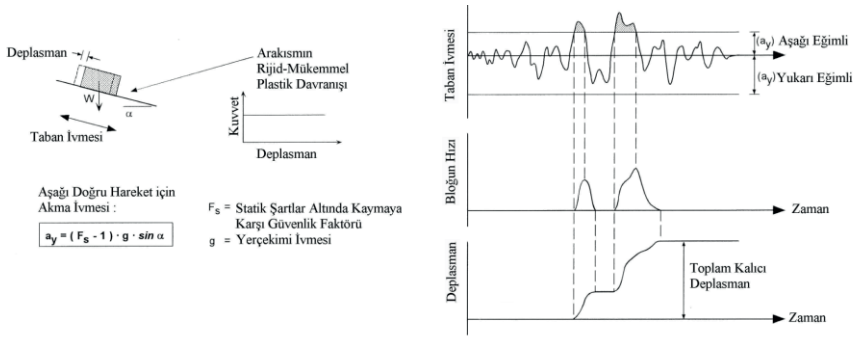
Burada a_y akma ivmesi (g), Ia Arias yoğunluğu (m/s) ve D beklenen yer değiştirmedir (cm). Bu nedenle, yer değiştirmeler belirli bir akma ivmesi için Arias yoğunluğundan basitçe hesaplanabilir.

Temel bir Newmark analizi gerçekleştirmenin farklı yöntemleri, tabanın aynı ivme davranışına dayanır. Taban ivmesi matematiksel bir fonksiyonla temsil edildiğinde gerekli entegrasyonlar kapalı formda tamamlanır. Yegian ve diğerleri (1991) çözüm için aşağıdaki ifadeyi belirlemiştir.

$$D = N_{eq} T^2 a_{max} f\left(\frac{a_y}{a_{\max}}\right) \quad (3.5)$$

Temel hareket kaydının varsayılan şekli, boyutsuz $f(a_y/a_{max})$ fonksiyonunu belirler; Yegian ve diğerleri (1991) dikdörtgen, üçgen ve sinüzoidal hareketler için çözümler sunmaktadır. Ayrıca, gerçek güçlü hareket kayıtlarının entegrasyonunu daha doğru bir şekilde yakalayan $f(a_y/a_{max})$ için bir polinom fonksiyonu Yegian ve arkadaşları (1991) tarafından sunulmuştur.

Burada N_{eq}, çevrim sayısı, D, tahmin edilen deplasman (cm), a_y, akma ivmesi (g), v_{max}, deprem kaydının hızı, a_{max}, en büyük yatay yüzey ivmesi, $f(a_y/a_{max})$ sinüzoidal harekete bağlı bir fonksiyondur (Şekil 3.5).



Şekil 3.4. Deplasmanların Newmark'ın Kayan Blok Modeli ile Hesabı (Rauch, 1997)

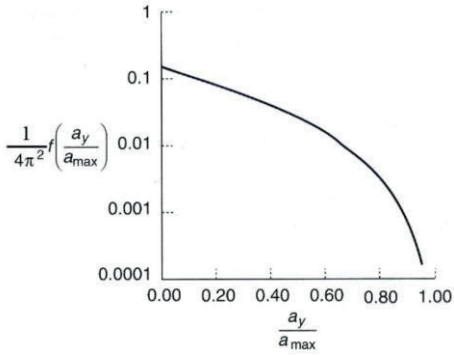
Newmark (1965) şev deformasyonlarının analizinde akma ivmesi için denklemler sunulmuş ve a_y için aşağıdaki kabulleri kullanmıştır. (Jibson, 1993; Bray vd. 1995).

- Son derece iyi tanımlanmış kayma yüzeyi veya kırılma mekanizması

- Zemin, iyi tanımlanmış ve dinamik yükler altında sabit kalan bir akma gerilmesi sergiler

- Plastik deformasyonlar, sürekli kayma gerilmesi altında zeminde meydana gelir (mükemmel plastik davranış).

Fark edilemeyen bir kayma yüzeyinin bulunduğu sıvılaşmış tabaka boyunca tipik olarak kayma meydana gelir. Dinamik yükleme sırasında altta yatan zeminin kesme mukavemetindeki anormal değişim ve bunu takip eden deformasyonlar sıvılaşma hasarının birincil nedenidir. Gerçekte, zemin sıvılaştıkça akma ivmesi önemli ölçüde değişir. Sıvılaşmanın neden olduğu şev deformasyonları için, bilinen araştırmaların çoğu için belirlenen akma ivmeleri uygun değildir (Rauch, 1999).



Şekil 3.5. a_y/a_{maks} ile $f(_{ay}/ a_{maks})$ arasındaki ilişki (Baziar ve diğ., 1992).

3.2.2. Towhata'nın minimum potansiyel enerji modeli

Yanal yayılma için analitik bir model Towhata ve diğerleri (1991, 1992) tarafından laboratuvarda bir sarsma tablası üzerinde yapılan ölçekli model testlerinden elde edilen sonuçlara dayanarak oluşturulmuştur. Towhata'nın modelinde yanal yayılmanın akma bitene ve min. enerji durumuna ulaşılana kadar devam etmesi beklenmektedir. Laboratuvar modeli deneylerinde, deney istenen deformasyonlar elde edilene kadar gerçekleştirilmiştir. Towhata'nın modeli, büyük miktarda yanal yayılma hareketinden kaynaklanan uzun süreli sismik olaylar için sahada iyi çalışır (Rauch, 1997).

Temel olarak modelde sıvılaşmamış yüzey zemini eksenel basınç altında eğimli doğrusal elastik bir kolon olarak modellenir. Yüzey zemininin "kolon" deformasyonları, altındaki sıvılaşmış zeminin aşağı doğru harekete engel teşkil etmediği varsayımı altında hesaplanmıştır. Daha sonra, örtü toprağının olmadığı eğimli bir alanda sıvılaştırılmış zeminin yer değiştirmelerini tahmin eden bir "akma modeli" ortaya koymuşlardır. Bu kavram, düz bir yüzey oluşana kadar sabit yer değiştirmeler olduğunu varsaymaktadır. Towhata bu iki basit modelin yetersiz olduğunu, ancak geliştirdiği minimum potansiyel enerji modelinin temel fikirleri içerdiğini savunmuştur. Şekil 3.6, Towhata'nın modelinin dayandığı temel eğim geometrisini göstermektedir. Ayrıca Towhata'nın modeli, model deneylerinde yapılan gözlemlerden türetilen dört temel varsayıma dayanmaktadır:

- Sıvılaştırılmış zemin katmanındaki dikey bir segmentin yatay deformasyonlarını göstermek için sinüzoidal bir denklem kullanılabilir.

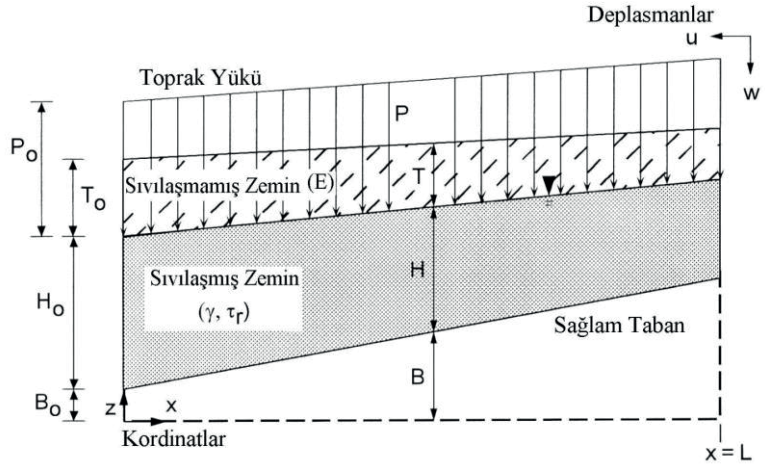
- Deformasyon boyunca sıvılaştırılmış zeminin hacmi sabit kalır.

- Kayma rijitliği ve mukavemeti genellikle sıfır olmasına rağmen, bu model uygulandığında sıvılaşmış zemin lineer-elastik, rijit-plastik davranış gösterir.

Bu hipotezlere dayanarak, potansiyel deformasyon enerjisini belirlemek için sıvılaşmış ve sıvılaşmamış zemin katmanlarının toplam yerçekimi enerjisi (dikey yer değiştirme ile ilişkili) hesaplanır.

Herhangi bir yer değiştirme durumundaki net potansiyel enerji için formüller oluşturulduğunda matematiksel olarak minimum enerji durumunu elde etmek için farklı teknikler kullanılır. Towhata ve diğerleri yatay yer değiştirmeler için kapalı formda bir çözüm sunmaktadır (1991, 1992). Çözümü, Şekil 3.6'te gösterilen parametreleri kullanarak formüle etmek mümkündür.

Towhata'nın modelinde, Şekil 3.8'te olduğu gibi sadece düzlemsel kesişime sahip basit kayma geometrileri dikkate alınabilir. Laboratuvar ölçekli model deneylerinin kontrollü ortamının aksine, sahadaki yanal yayılmalar genellikle çok karmaşık geometriler, özellikle de akarsu kıyıları gibi dikey serbest yüzeyler içerir. Towhata'nın yöntemini kullanmak için öncelikle bu son derece karmaşık kriterleri somutlaştıran gösterimin belirlenmesi gerekir. Burada E, tüm yer değiştirme aralığı boyunca zemin tabakasının düzlem deformasyon sıkışmasını temsil eden sekant tipi bir modüldür.



Şekil 3.6. Towhata'nın Minimum Potansiyel Enerji Modeli Kullanılarak Yanal Yayılmanın Hesaplanmasında Kullanılan Geometri (Towhata ve diğ., 1991)

Burada,
$B = B_0+ax$ = Sağlam tabanın kalınlığı
$H = H_0+bx$ = Sıvılaşmış zeminin kalınlığı
$T = T_0+cx$ = Sıvılaşmamış yüzey zeminin kalınlığı
$P = P_0+ex$ = Yüzeysel zeminin kalınlığının da içeren zemin basıncı
a, b, c, e = B, H, T ve P'nin lineer değişimini tanımlayan parametreler
x, y = Koordinatlar
u, w = Nihai deplasmanlar
γ = Sıvılaşmış zeminin birim hacim ağırlığı
τ_r = Sıvılaşmış zeminin rezidüel kayma mukavemeti ($\tau_r = 0$ kabul edilir)
E = Sıvılaşmamış yüzey zeminin elastik modülü

Tokida ve diğerleri (1993) Towhata'nın minimal potansiyel enerji modelinin basitleştirilmiş bir versiyonunu önermiştir. Towhata'nın yaklaşımını kullanarak, çeşitli parametrik hesaplamaların sonuçlarının regresyon analizlerine dayanan basitleştirilmiş denklemler oluşturmuşlardır. (Tokida vd. 1993) kayma merkezinin maksimum yer değiştirmesi için:

10m≤ L ≤100 m için $D = 1.73x10^{-5}.L^{1.94}.H^{0.298}.T^{-0.275}.\theta^{0.96}$ (3.7)

100 m≤ L ≤1000 m için $D = 1.29x10^{-5}.L^{1.99}.H^{0.280}.T^{-0.243}.\theta^{0.995}$ (3.8)

Formüllerinden faydalanılabilir Burada T sıvılaşmamış yüzey tabakasının ortalama kalınlığı (m), D yatay yer değiştirme (m), H sıvılaşmış tabakanın ortalama kalınlığı (m), L kaymanın uzunluğu (m) ve zemin yüzeyinin eğimi (%) olup her bir tabaka kesişiminin eğimine eşit olduğu varsayılır.

Orense ve Towhata (1992) son derece karmaşık uygulamalar için minimum potansiyel enerji modelini üç boyutta incelemiştir. Orense ve Towhata, minimum enerji senaryosu için toplam enerji denklemini iki boyutlu bir yüzey integraline indirgedikten sonra çözmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Aynı varsayımlar sonlu elemanlar modelinin de temelini oluşturmaktadır. Nihai deformasyon durumuna ulaşmayan yanal yayılmaların modellenmesi Towhata'nın minimum potansiyel enerji yöntemiyle mümkün değildir. Özetle, Towhata'nın analitik modelinin makul tahminler sağladığı ve oldukça basit olduğu

düşünülmektedir. Bununla birlikte, bu yaklaşımın dört önemli sorunu vardır:

- Bu modeli oluşturmak için sarsma tablası modelleri kullanılarak yapılan deneyler kullanılmıştır. Bu modelin arazinin genel davranışını doğru bir şekilde yansıtmaması mümkündür. Örneğin, kararlı durum deformasyonları boyunca arazideki kayma direnci, düşük efektif gerilmeler nedeniyle sarsma tablası modellerinde bu direnç daha azdır. Towhata ve diğerlerine (1991, 1992) göre, sıvılaşmış zeminde kayma direnci yoktur.

- Değerlendirme nispeten basit kayma geometrileri ile sınırlıdır. Temel modelde, çoğunlukla yanal yayılmaya bağlı olan aşırı eğimlere sahip serbest yüzeyleri hesaba katmak zordur.

- Sıvılaşmamış yüzey zemin tabakasının elastik sertliğini (elastisite modülü) temsil eden parametre Towhata'nın modelini yönlendiren ana parametredir. Bununla birlikte, modelin bu parametreye ne kadar duyarlı olduğu gösterilmemiştir.

- Bu modelin tahmin edebildiği tek şey en büyük ya da nihai yer değiştirmelerdir. Kısa süreli sarsıntılar nedeniyle, yanal yayılmanın büyük bir kısmı nispeten az bir bozulma ile gerçekleşmektedir.

3.3. Ampirik Modeller

Çeşitli basitleştirme dereceleriyle, daha önce ele alınan sayısal ve analitik teknikler, sıvılaşmanın neden olduğu yanal yayılmanın fiziksel davranışını simüle etmeye çalışan mekanik yaklaşımlardır. Ampirik modellerin temeli, farklı arazi faktörleri ve yer değiştirmeler arasında gözlemlenen korelasyonlardır.

3.3.1. Youd ve Perkins'in LSI (sıvılaşma şiddeti indeksi) modeli

Youd ve Perkins, deprem kaynak parametreleri ile şiddetli yer hareketleri arasında basit bir ilişki formüle etmişlerdir. Bu formül, sıvılaşma tehlikesinin yeni yapılaşmaya başlanan alanlarda kullanımı için uygundur. Youd ve Perkins, yanal yayılmaya bağlı zemin deformasyonlarının şiddetini belirtmek için Sıvılaşma Şiddet İndeksi (LSI) adı verilen tek bir parametre ortaya koymuştur. LSI, zemin kırığı yer değiştirmesinin maksimum büyüklüğü olarak tanımlanır (d ≈LSI) ve milimetre olarak ölçülür. LSI özellikle 10m'den büyük nehir yatakları içindeki yanal

yayılma ve yakın zamanda oluşan nehir yatakları da dahil olmak üzere jeolojik olarak sığ, sürekli, iri taneli, sıvılaşabilir zeminlere sahip hafif eğimli yamaçlardaki deformasyonlar için tanımlanır. SPT N_{30} = 2-10 olan sıvılaşabilir bölgelerde de kullanılır. Genellikle en büyük yer değiştirme, kendine özgü yerel koşulların neden olduğu istisnai derecede önemli hareketler hariç olmak üzere tektir. Ayrıca, LSI, yeterince ciddi kırıklar dikkate alınarak 2,5 metrelik bir yer değiştirme için maksimum 100 sınırına sahip olacak şekilde rastgele seçilir. Bu nedenle, tipik bir jeolojik yapıda, LSI yanal yayılmadan kaynaklanan en büyük yer değiştirmeyi gösterir.
Aşağıdaki Şekil 3.7, Youd ve Perkins (1987) tarafından Alaska'da ve Amerika Birleşik Devletleri'nin batısındaki çeşitli yerlerde meydana gelen geçmiş depremlere ilişkin vaka çalışmalarına dayanarak sağlanan, deprem büyüklüğü ve mesafesine ilişkin LSI bağlantısının grafiksel bir gösterimidir:

$$\log \mathrm{LSI} = -3.49 - 1.86 \times \log \mathrm{R} + 0.98 \times \mathrm{M_w} \qquad (3.9)$$

Burada Mw moment büyüklüğü, R ise sismik enerji kaynağına olan yatay uzaklıktır.

Sıvılaşma ve yanal yayılmanın neden olduğu deformasyonlara ilişkin üst sınır tahmini ampirik LSI modeli tarafından sağlanmaktadır. Başka bir deyişle, herhangi bir yanal yayılma yer değiştirmesi muhtemelen denklem 3.9'un öngördüğünden daha küçük olacaktır. LSI modeli sıvılaşma tehlikesini haritalamak için faydalı bir araçtır, ancak sahaya özgü faktörleri göz ardı ettiği için tekil yanal yayılma araştırmaları için çok güvenilir değildir.

Deprem moment büyüklükleri aralığı, Mw=8.1 (San Francisco 1906)-9.2 (Alaska 1964), Şekil 3.7'daki veri noktaları ile gösterilmektedir. Burada R=0-420 km arası, sismik enerji kaynağı ile yüzey yansıması arasındaki minimum yatay mesafedir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, LSI M_w ile artmakta ve R ile azalmaktadır. LSI, R için M_w'ye oldukça duyarlıdır.

3.3.2. Hamada'nın Ampirik Modeli

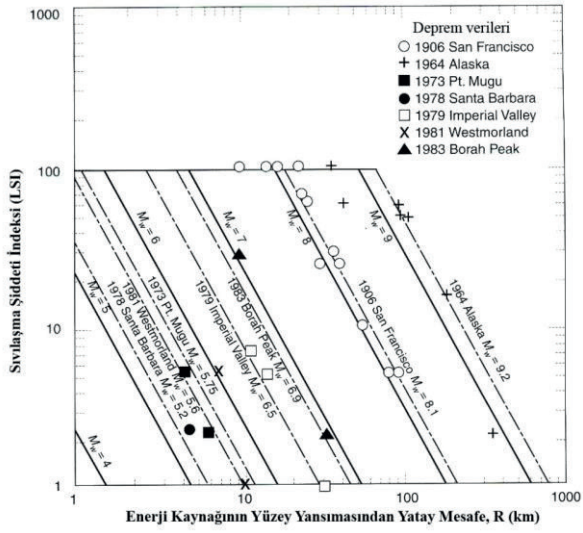
Yatay yer değiştirmeler için temel bir ampirik model Hamada ve diğerleri (1986, 1987) tarafından San Fernando Vadisi (Kaliforniya) ile Niigata ve

Noshiro'da (Japonya) yürütülen yanal yayılma araştırmalarına dayanarak oluşturulmuştur. Çoğunluğu Nashiro'dan olmak üzere 60 örneğe dayanarak temel bir regresyon denklemi geliştirmişlerdir (Hamada vd., 1994).

$$D = 0.75 * \sqrt{H} * \sqrt[3]{\theta} \qquad (3.10)$$

Bu durumda, D yatay yer değiştirmedir (m) ve θ olarak zemin yüzeyi yada sıvılaşan zemin tabanının eğiminden büyük olanı alınır ve serbest yüzeyin topuğuna göre ölçülür. H sıvılaşmış toprak tabakasının kalınlığıdır (m). H, birden fazla zemin katmanı sıvılaştığında ölçülür; en üstteki sıvılaşmış tabakadan başlayıp en altta biten tüm ara zemin katmanları dahil edilir.

Hamada ve çalışanları tarafından toplanan veriler Denklem 3.10'a iyi bir şekilde uymaktadır. Bununla birlikte, Noshiro'nun yanal yayılmaya karşı büyük hassasiyeti nedeniyle bu veri tabanı yalnızca sınırlı bir sismik ve topografik koşullar aralığını kapsamaktadır. Yukarıda bahsedilen denklem ince daneli zemin bölgelerinde kullanılırken dikkatli olunmalıdır çünkü bu denklem oldukça homojen orta dane boyutuna sahip kumlu zeminler üzerinde yapılan gözlemlere dayanarak geliştirilmiştir. Denklemin doğruluğu bu sınırların dışında bilinmemektedir.



Şekil 3.7. Sıvılaşma Şiddeti Indeksi grafiği (Youd ve Perkins, 1987)

Hamada ve diğerleri (1986) zeminin yer değiştirmesini ölçmek için depremden önce ve sonra çekilen hava fotoğraflarını kullanmıştır. Yer değiştirme yönleri eğime neredeyse paraleldir. Zemin kırıklarının çoğu, devam eden zemin yer değiştirmesinin olduğu bölgelerde bulunmuştur ve yönleri yatay yer değiştirme yönlerine neredeyse diktir. Hamada ve diğerleri (1986) tarafından yapılan araştırmaya göre, daha dik zemin eğimleri ve daha kalın sıvılaşmış zemin katmanları daha büyük kalıcı zemin yer değiştirmesine neden olma eğilimindedir. Zemin yüzeyinin daha düz ve sıvılaşan katmanların daha ince olduğu yerlerde şev topuğunun yakınındaki sürekli zemin yer değiştirmeleri önemli ölçüde daha küçüktür.

Hamada ve diğ. (1986)'e göre zemin deplasmanın büyüklüğünü etkileyen faktörlerden bazıları:

a. Sıvılaşan zemin tabakasının kalınlığı
b. Zemin yüzeyi eğimi
c. Sıvılaşan katmanın eğimi, katmanın hem üst hem de alt sınırlarını içerir
d. Sıvılaşmış tabakanın derinliği (sıvılaşmış tabakanın üst ve alt sınırları arasındaki mesafe).
e. Sıvılaşma direnci faktörü (F_L) minimum değeri
f. Sıvılaşma potansiyeli indeksi, P_L'dir.

3.4. Fiziksel Modeller

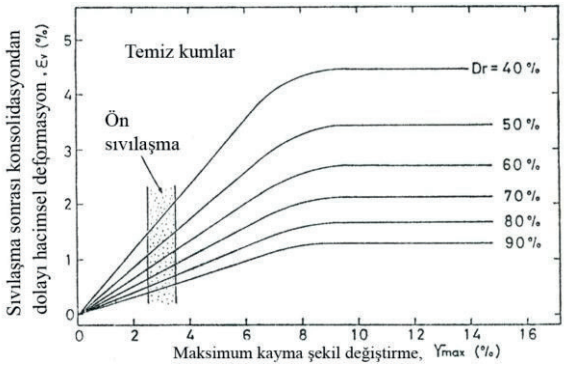
Sıvılaşma mekanizması sıklıkla fiziksel modeller kullanılarak incelenmiştir. Bunlar dinamik üç eksenli sıkıştırma testi, dinamik basit kesme testi, dinamik burulmalı kesme testi, santrifüj testi ve sarsma masası testinden oluşmaktadır. Aşağıda bu test sistemleri kullanılarak oluşturulan modellerden biri açıklanmaktadır.

3.4.1. Ishihara ve Yoshimine Yöntemi

Ishihara ve Yoshimine (1992) tarafından önerilen yöntem, çok sayıda laboratuvar test sonucundan elde edilen iki temel yaklaşıma dayanmaktadır. Bunlardan ilki, doymuş kumun hacim değişimi ile maksimum kayma gerilmesi arasındaki ilişkidir. Bu bağlamda, farklı rölatif sıkılıklara sahip temiz kumlar üzerinde yapılan basit kesme deneylerinin sonuçları Şekil 3.7'da gösterilmektedir. Bu grafik, yeniden

konsolidasyon sırasındaki hacimsel deformasyonu (ε_v) ve numunenin drenajsız düzensiz yükleme sırasındaki maksimum kayma gerilmesini (γ_{maks}) göstermektedir. Şekil 3.8'daki korelasyonu kullanarak bir kum tabakasının sıvılaşmanın neden olduğu oturmayı tahmin etmek için maksimum kayma gerilmesini belirlemek önemlidir.

İkinci temel yöntem, maksimum kayma gerilmesi ile sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü arasındaki korelasyona dayanmaktadır. Analizlerine göre, eksenel birim deformasyon ε=%2,5 için denklem 3.12 kullanılarak sıvılaşma için güvenlik faktörü (F_L) hesaplanabilir. Araştırmalarında F_L'yi eksenel birim deformasyonun bir fonksiyonu olarak dikkate almışlardır. Ayrıca, ε±%2,5 eksenel birim deformasyonla sonuçlanan dinamik yumuşama koşulu F_L=1 ile gösterilir, yani F_L<1 (±%2,5'ten daha büyük eksenel birim deformasyon) ise zemin yumuşamıştır



Şekil 3.7. Maks. Kayma Şekil Değ. ile Hacim. Def.Arasındaki İlişki (Ishihara, 1996)

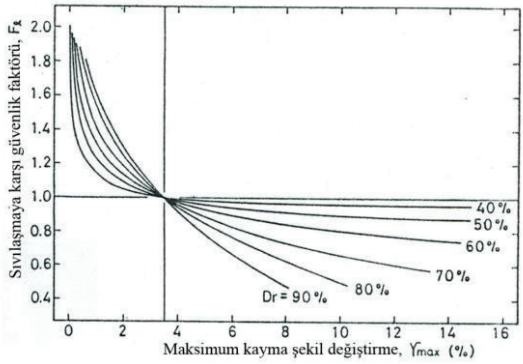
$$F_L = \frac{\tau_{max,L}/\sigma_v'}{\tau_{max,}/\sigma_v'} = \frac{\tau_{av,L}/\sigma_v'}{\tau_{av}/\sigma_v'} \qquad (3.12)$$

Burada σ_v' düşey efektif gerilme, τ_{av}/σ_v'=uygulanan gerilme oranı, $\tau_{av,L}/\sigma_v$'=eşdeğer gerilme oranıdır.

Yukarıda belirtilen veriler ışığında, kayma deformasyonu ile sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü arasındaki korelasyon, çok sayıda dinamik basit kayma deneyinin sonuçları ile belirlenmiştir.

Bir zemin profili için toplam yanal deformasyon miktarı, her bir sıvılaşabilir zemin katmanı için bulunan maksimum kayma gerilmesi

genliklerinin katmanların kalınlığı ile çarpılması ve ardından bunların toplanmasıyla hesaplanabilir.



Şekil 3.8. Maks. Şekil Değ. ile Sıvılaşmaya Karşı Güv. Fak. Arasındaki İlişki (Ishihara, 1996)

4. Oturmaların Belirlenmesi İçin Geliştirilen Yöntemler

Aşırı boşluk suyu basıncının oluşması, kumun tamamen doygun olması ve drenajın mümkün olmaması durumunda sarsıntının en önemli ilk sonucudur ve sabit hacim koşullarının korunmasına izin verir. Yüksek boşluk suyu basıncı azaldıkça oturma meydana gelir. Doygunluk seviyesine bağlı olarak, doymamış kumlarda oturma, sürekli düşey efektif gerilme koşulları altında sismik sarsıntı sırasında meydana gelebilir. Her iki durumda da önemli yer hareketinin bir etkisi zemin oturmasıdır (FHWA, 1997). Doymamış kumlarda ise oturma, deprem sırasında sabit efektif düşey gerilme altında meydana gelebilir. Geçirgenlik ve hidrolik gradyan, depremler sırasında sıvılaşmış kumun oturmasını düzenler (Ragheb, 1994). Yanal yayılmada, hasarın çoğunu yatay deformasyon oluştursa da, farklı oturma ile birlikte önemli dikey yer değiştirmeler de meydana gelir. Bu bölümde sıvılaşma ile ilgili oturma tahmini için temel tek boyutlu modeller incelenmektedir.

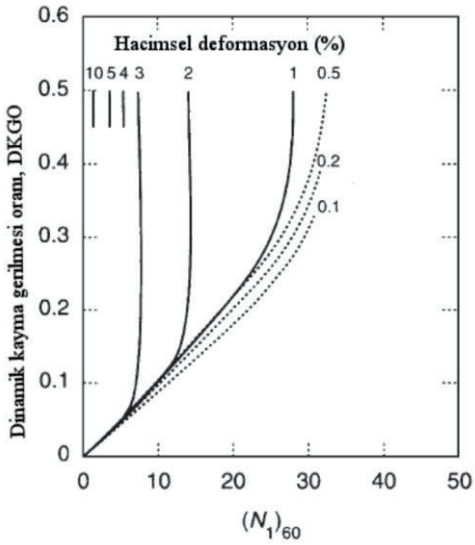
Bir deprem meydana geldiğinde boşluk suyu basıncındaki artış nedeniyle sıvılaşma veya direnç kaybının meydana geleceği iyi bilinmektedir. Depremin sona ermesinin ardından boşluk suyu basıncının sönümleneceği ve hacim değişikliklerinin de bunu takip edeceği

bilinmektedir. Yüzey oturması bu durumun bir yansımasıdır. Düzensiz zemin koşullarının varlığında, bazı bölgelerin diğerlerine göre daha fazla hacim değişikliği yaşayacağı ve sonuç olarak bu farklı oturmaların yapılara ciddi zarar verme olasılığının yüksek olduğu açıktır. Kumlarda sıvılaşma sonrası hacim değişiminin sadece yoğunluğa bağlı olmadığı, aynı zamanda maksimum kayma deformasyon oranına da etki ettiği anlaşılmaktadır (Ishihara ve Yoshimine, 1992).

4.1. Tokimatsu ve Seed (1987)

Rölatif sıkılık (Dr) ve penetrasyon direnci arasındaki saha korelasyonlarına dayanarak Tokimatsu ve Seed'in (1987) çizelgeleri kullanılmaktadır. Belirli sayıda SPT için dinamik kayma gerilmesi altındaki bir zeminin öngörülen hacimsel deformasyonu Tokimatsu ve Seed (1987) tarafınca sağlanan grafikte gösterilmektedir (Şekil 4.1).

Tokimatsu ve Seed'e (1987) göre, deprem sonrası oturmaların başlıca belirleyicileri depremin büyüklüğü, kumun rölatif sıkılığı veya SPT-N değeri, doymuş kumlarda boşluk suyu basıncının oluşmasından kaynaklanan dinamik gerilme oranı ve kuru veya kısmen doymuş kumlarda maksimum dinamik kayma deformasyonudur. Dinamik kayma gerilmesine maruz kalan bir zeminin öngörülen hacimsel deformasyonu, bu hususlar dikkate alınarak Şekil 4.1'de düzeltilmiş SPT-N değerine ($(N_1)_{60}$) karşı çizilmiştir. Tokimatsu ve Seed (1987) grafiği, dinamik gerilme oranına ve hesaplanan $(N_1)_{60}$ değerine dayalı olarak her bir katman için hacimsel deformasyonu hesaplamak için kullanılabilir. Bu hacimsel deformasyon değerleri derinliğe göre düzeltilerek edilerek zemin yüzeyi çökmeleri hesaplanabilir.



Şekil 4. 1. GF>1 (kesikli çizgi) ve GF≤1 (sürekli çizgi) durumları için Temiz Kumlada Zemin Yüzündeki Oturmayı Tahmin için Kullanılan Grafik (Tokimatsu ve Seed (1987) tarafından önerilen kart Kramer (1996) tarafından modifiye edilmiştir)

4.2. Ishihara ve Yoshimine (1992)

Bu yöntemi elde etmek için dinamik basit kesme testinin sonuçları kullanılmıştır. Sıvılaşma ile ilgili oturmalar Ishihara ve Yoshimine (1992) tarafından önerilen teknik kullanılarak hesaplanabilir. Hacimsel deformasyon (ε_v) ve sıvılaşma güvenlik faktörü (GF) ile bağlantılı olarak çeşitli rölatif sıkılık veya Japon SPT-N (SPT-N_1) değerleri (veya q_{c1}) bu yöntemde kullanılan grafikte gösterilmektedir (Şekil 4.2). Ishihara ve Yoshimine (1992) tarafından sağlanan 3.12 - 3.17 numaralı denklemler kullanılarak, SPT veya CPT penetrasyon direnci bilgilerinden rölatif sıkılık (Dr) ve düzeltilmiş koni ucu direnci (q_{c1}) hesaplanabilir.

Burada N ölçülmüş SPT-N değeri, N_1 efektif gerilmelere göre düzenlenmiş SPT-N değeri, σ_v' efektif düşey gerilmeleri (kgf/cm²), q_c koni uç direnci (kgf/cm²), q_{c1} düzeltilmiş koni uç direncini göstermektedir.

$$D_r = \sqrt{N_1} \tag{3.12}$$

$$N_1 = C_N * N \tag{3.13}$$

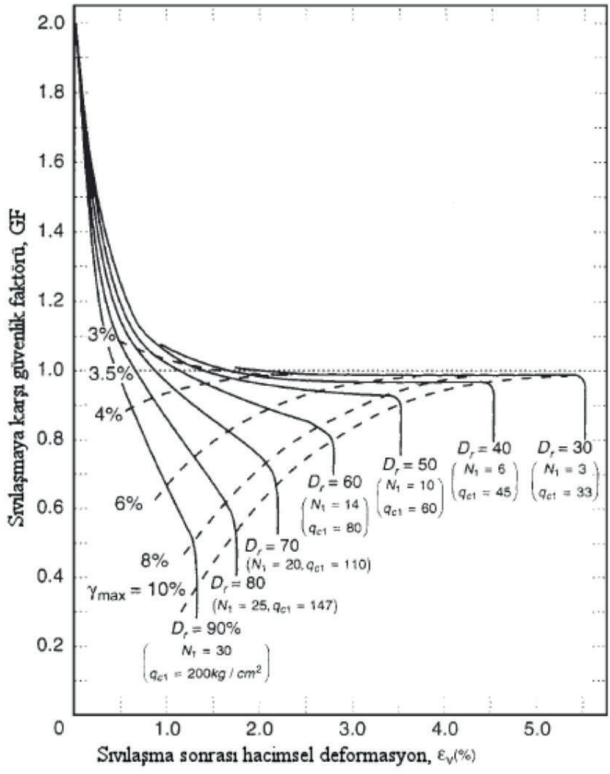
$$C_N = \frac{1.7}{\sigma_v' + 0.7} \tag{3.14}$$

$$D_r = -85 + 76 * \log q_{c1} \tag{3.15}$$

$$q_{c1} = C_N * q_c \tag{3.16}$$

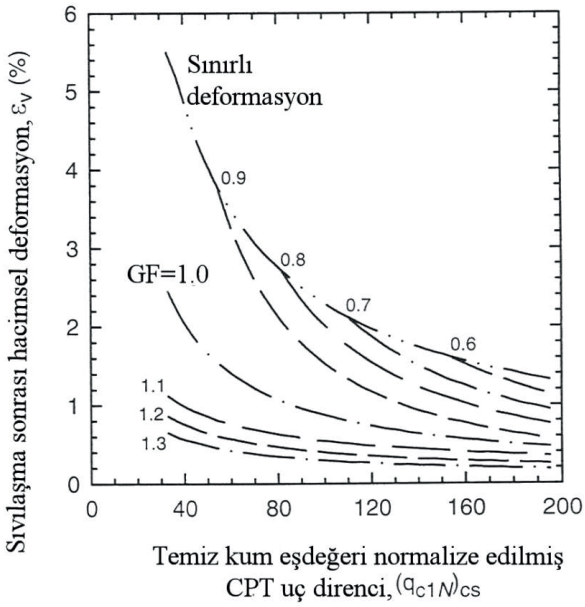
$$C_N = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{v'}}} \tag{3.17}$$

Ayrıca, Ishihara ve Yoshimine (1992) eğrilerini göz önüne alarak, Zhang ve diğerleri (2002) yeni bir deneysel sistem kullanarak hacimsel şekil değiştirmenin belirlenmesi için bir abak tanımlamıştır. Şekil 4.3, bu yazarların çeşitli GF için sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon (εv) ile temiz kum eşdeğer normalize edilmiş CPT uç direnci $(q_{c1N})_{cs}$ arasındaki bağlantıyı göstermek için oluşturdukları grafiği göstermektedir. Her CPT değeri için εv bu grafik kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 4.2. Temiz Kumlarda Zemin Yüzündeki Oturmayı Tahmin için Verilen Grafik (Ishihara ve Yoshimine (1992) tarafından önerilen grafiği Kramer (1996) modifiye etmiştir)

Daha önce belirtilen verilere dayanarak, oturma aşağıdaki formül kullanılarak belirlenir. Sıvılaşmayı önlemek için öncelikle güvenlik faktörleri (GF) hesaplanır (Seed vd., 1971, Seed vd., 1983, Ishihara vd., 1985, Youd vd., 2001a). N_1, q_{c1} veya rölatif sıkılığı bilinen değerlerine dayanarak, hesaplanan güvenlik katsayılarına karşı gelen hacimsel şekil değiştirme oranları hesaplanır. Zemin profilindeki her katman bu işleme tabi tutulur. Hacimsel deformasyon oranının hesaplanması ve derinlikle entegre edilmesi, depremlerin neden olduğu yüzey oturması miktarının tahmin edilmesini sağlar.



Şekil 4.3. Farklı Güv. Faktörleri için Temiz Kum Eşd. Normalize CPT Uç Dir. ve Hacimsel Def. İlişkisi (Zhang ve diğ., 2002)

5. Sonuçlar

Zemin sıvılaşması ve yanal yayılma, büyük depremler sırasında meydana gelen yıkıcı hasarların bazılarına oluşturan iki ana faktördür. Sıvılaşma ve yanal yayılma mekanizmalarının iyi anlaşılabilmesi için ilk kayma gerilmelerinin zemin dayanımı üzerindeki etkisi ve deprem sırasında ve sonrasında zeminde gerçekleşecek boşluk suyu hareketinin potansiyel sonuçlarının tespit edilmesi gerekir.

Bu çalışmada, "depremler sırasında görülen yanal zemin

deformasyonlarının" mühendislik yapılarına verdiği zararlar ve bu deformasyonların tahmini üzerinde durulmuştur. Efektif gerilmenin sıfıra yakın olduğu geniş arazilerde (sıvılaşma) zemin yüzeyinde büyük yer değiştirmelerin meydana geldiği bilinmektedir. Yanal yayılma olayı genelde düşük eğime sahip bölgelerde görülmektedir. Yer değiştirmenin (yanal yayılma) büyüklüğünü ve yönünü zemin yüzeyinin eğim açısı belirlemektedir. Ayrıca, yer değiştirmeler sıvılaşmış tabakanın en alt yüzeyinin kalınlığından ve eğiminden önemli ölçüde etkilenir (Yoshida, 1989). Bu etkilerin yanı sıra, yanal yayılma, pek çok araştırmacı tarafından farklı yöntemlerle incelenmiş ve çok çeşitli faktörlerden etkilendiği tespit edilmiştir. Araştırmacılar, yanal yayılmadan kaynaklanan oturmaların değerlendirilmesinde kullanılan hacimsel deformasyonu ve yanal yayılmanın belirlenmesinde yardımcı olan kayma deformasyonlarını çeşitli teknikler kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Sonuç olarak, her yaklaşım belirli kısıtlamalara sahiptir ve analizlerde bu kısıtlamaların dikkate alınması gereklidir.

KAYNAKLAR

Bartlett, S. F., and Youd, T. L ., 1992a. Empirical prediction of lateral spread displacement, Proc. 4 th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for soil liquefaction , Buffalo, NY, National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report NCEER-92-0019, Eds. Hamada, M. and O'Rourke, T. D., August 12, 351-365.

Bartlett, S. F., and Youd, T. L ., 1992b. Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction-induced lateral spreads, National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report NCEER-92-0021 , Buffalo, NY, August 17, 114-126.

Baziar, M. H., Dobry, R., and Elgamal, A-W. M. , 1992. Engineering evaluation of permanent ground deformations due to seismically-induced liquefaction, Buffalo, NY, National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report NCEER-92-0007 , March 24.

Bray, J D., Augello, A.J., Leonards, G. A., Repetto, P. C., and Byrne, R. J. , 1995. Seismic stability procedure for solid-waste landfills, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE , 121 , 139-151.

Byrne, P. M., Jitno, H., and Salgado, F., 1992. Earthquake induced displacements of soil structure systems, Proc., 10 th World Conf. on Earthquake Engineering , A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1407-1412.

FHWA, 1997. Geotechnical engineering circular No. 3-design guidance: geotechnical earthquake engineering for highways, Volume I: design principal, Volume II: design examples, Kavazanjian, Matasovic, Hamou, and Sabitini, FHWA-SA-97-076 and 077 , U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington.

Glaser, S. D. , 1994. Estimation of surface displacement due to earthquake excitation of saturated sands, Earthquake Spectra , EERI , 10 , 489-517.

Gökçe, O., Şenay Ö. ve Ahmet D., 2008. Türkiye'de Afetlerin Mekansal ve İstatistiksel Dağılımı Afet Bilgileri Envanteri, T.C. Bayındırlık ve İskanBakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Afet Etüt ve Hasar Tespit Daire Başkanlığı, Ankara

Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R., and Emoto, K. , 1986. Study on liquefaction induced permanent ground displacement, The Association for the Development of Earthquake Prediction in Japan , November 1, 87.

Hamada, M., Towhata, I, Yasuda, S. and Isoyama, R. , 1987. Study on permanent ground displacement by seismic liquefaction, Computers and Geotechnics ,

4 , 197-220.

Hamada, M., Sato, H., Kawakami, T., 1994. A consideration of the mechanism for liquefaction-related large ground displacement. In: Proceedings from the Fifth US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Soil Liquefaction , Salt Lake City, USA, technical report NCEER-94-0026, 217-232.

Housner, G. W., 1985. Liquefaction of soils during earthquakes, Committee on Earthquake Engineering Commission on Engineering and Technical Systems National Research Council , National Academy Pres, Washington, USA.

Ishihara, K. 1996. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics , 1rst ed., Oxford, Claredon Press.

Ishihara, K. and Yoshimine, M. , 1992. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquake, Soils and Foundations , 32 , 173-188.

Jibson, R. W., 1993. Predicting earthquake-induced landslide displacement using Newmark's sliding block analysis, Transportation Research Record , 1411 , 9-17.

Kaya, Z., 2008. Depremler sırasında zeminlerin davranışına bağlı olarak meydana gelen zemin deplasmanlarının belirlenmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Kokusho, T., and Fujita, K., 2002. Site investigations for involvement of water films in lateral flow in liquefied ground, J. Geotech. and Geoenvir. Engrg ., 128(11) , 917-925.

Newmark, N. M., 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments, Fifth Rankine Lecture, Geotechnique , 15(2) , 139-159.

O' Rourke, T.D., Lane, P. A., 1989. Liquefaction hazards and their effects on buried pipelines, NCEER-89-0007 , National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y.

Orense, R., & Towhata, I., 1992. Prediction of liquefaction-induced permanent ground displacements: a three-dimensional approach. In Technical Report NCEER (Vol. 1, No. 92-0019, pp. 335-49). US National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER).

Ragheb, A. M., 1994. Numerical analysis of seismically induced deformations in saturated granular soil strata, PhD Thesis , Rensselaer Polytechnic Institute, Troy New York.

Rauch, A. F., 1997. EPOLLS: An emp. Meth. for predicting surface displ. due to liquefaction-induced lateral spreading in earthquakes, PhD Thesis , Virginia

Polytec. Ins., Blacksburg, Virginia.

Sasaki, Y., Towhata, I., Tokida, K., Yamada, K., Matsumoto, H., Tamari, Y. and Saya, S. , 1992. Mechanism of permanent disp. of ground caused by seismic liquef., S. and Foun. , 32(3) , 79-96.

Seed, H.B., and Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division , 97(SM9) , 1249-1273.

Seed, H. B., Idriss, I. M. and Arango, I., 1983a. Evaluation of liquefaction potential using field performance data, Journal of Geotechnical Engineering, 109(GT3) , 458-482.

Tokida, K., Matsumoto, H.,Azuma, T., and Towhata, I. ,1993. Simplified procedure to estimate lateral ground flow by soil liquefaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering VI , A. S. Çakmak and C. A. Brebbia (eds.), New York, 381-396.

Tokimatsu, K., and Seed, H. B. , 1987. Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE , 113 , 861-878.

Towhata, I., Tokida, K., Tamari, Y., Matsumoto, H., Yamada, K., 1991. Prediction of permanent lateral displacement of liquefied ground by means of variational principle, Proceedings from the third Japan-U.S.Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, State University of Newyork at Buffalo , Eds. O'Rourke, T. D., Hamada, M., Technical Report NCEER-91-0001, 237-251.

Towhata, I, Sasaki, Y., Tokida, K., Matsumoto, H., Tamari, Y. and Yamada, K. , 1992. Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle, Soils and Foundations , 32 , 97- 116.

Yasuda, S., Nagase, H., Kiku, H, and Uchida, Y. , 1991a. A simplified procedure for the analysis of the permanent ground displacement, Proc., 3 rd Japan-U. S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for soil liquefaction , Buffalo, NY, National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report NCEER-91-0001, T. D. O'Rourke and M. Hamada (ed.), February 1, 225-236.

Yasuda, S., Nagase, H., Kiku, H, and Uchida, Y. , 1991b. Countermeasures against the permanent ground displacement due to liquefaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering V, Proc., Fifth Int. Conf. , Karlsruhe, Germany, September, 341-350.

Yasuda, S., Yoshida, N., Kiku, H., Adachi, K., 1999. A simplified practical method for evaluating liquefaction-induced flow , Proceedings of the Seventh U.S.-

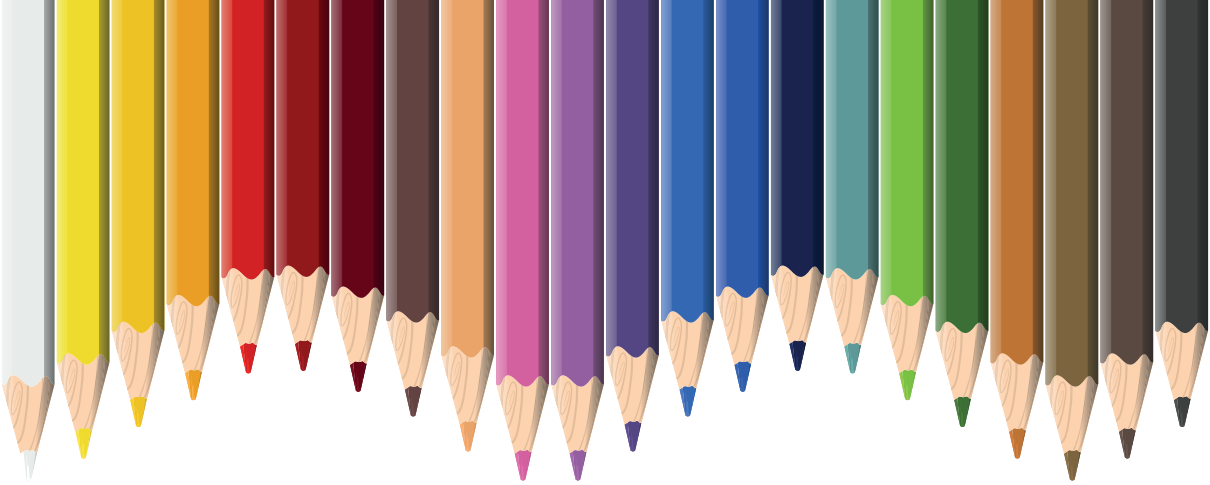
Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction , State University of Newyork at Buffalo, Eds. O'Rourke, T. D., Bardet, J. P., Hamada, M., Technical Report NCEER-99-0019, 311-320.

Yegian, M K., Marciano, E. A., and Ghahraman, V. G. , 1991. Earthquake-induced permanent deformations: Probabilistic approach, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE , 117 (1) , 35-50.

Youd, T. L. and Perkins, D. M. , 1987. Mapping of liquefaction severity index, Journal of Geotechnical Engineering , 113 , 1374-1392.

Youd T. L., 2001b. Latest Procedures for Liquefaction Hazard Evaluation, TC4 Satellite Conference, Geotechnical Earthquake Engineering and Microzonation Seminar for Local and Young Engineers, Istanbul, August 24.

Zhang, G, Robertson, P. K. and Brachman, R. W. I. , 2002. Estimating liquefaction-Induced ground settlements from CPT for level ground, Canadian Geotechnical Journal , 39 , 1168-1180.



Bölüm 10

DETONASYON VE ŞOK DALGALARINDA EKSERJİ ANALİZİ

Arzu Keven[1]
Cengiz Öner[2]

1 Kocaeli Üniversitesi Gölcük MYO, Kocaeli, Türkiye (ORCİD: 0000-0003-0040-9167) arzu.keven@kocaeli.edu.tr
2 Bingöl Universitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği, Bingöl,Türkiye (ORCID: 0000-0002-3278-2831) coner@bingol.edu.tr

GİRİŞ

Reaktif bir karışım içinde yanma dalgasının olması, bu yanma dalgasının belli hızda yol almasına göre yanma dalgalarını eksplozyon, deflagrasyon ve detonasyon şeklinde isimlendirilir. Eksplozyon olayında yanma dalgası ya da bir alev cephesi teşekkül etmemektedir [1]. Özellikle deflagrasyon ve detonasyonu tanımlamak ve özelliklerini açıklamak gerekir. Vurgulamak gerekirse bu çalışma özellikle detonasyon olayına genel bir bakıştır, detonasyon olayı açıklanırken şok dalgalarında ekserjj analizi üzerinde durulacaktır.

Bir yanma dalgası ateşleme kaynağından uzağa doğru yayılır. Yanma Dalgaları reaktanları ürünlere dönüştürerek potansiyel enerjiyi açığa çıkarırlar ve daha sonra bu enerji ürünlerin iç ve kinetik enerjisine dönüştürülür. Açığa çıkan enerjinin bir sonucu olarak bir yanma dalgası boyunca termodinamik ve gaz dinamiğinde büyük değişiklikler meydana gelir. Dalga boyunca olan gradyan alanları fiziksel ve kimyasal süreçleri meydana getirir, bu yanma dalgasının kendi kendine yayılasına sebep olur. Genel olarak ifade edecek olursak deflagrasyon ve detonasyon olmak üzere kendi kendine yayılan iki tür yanma dalgası vardır. Deflagrasyon dalgaları önündeki reaktanlara göre nispeten sübsonik yani ses altı hızlarda yayılır [2]. Deflagrasyoda alev cephesi hızının ses hızının altında olduğu bir ses altı bir yanma dalgası teşekkül etmektedir, bu olayda iki ucu açık olan bir tüpte bulunan yanıcı gaz bir uçtan tutuşturulduğunda ortaya çıkan alev hızı, yakıtın cinsi, karışımı oluşturanların oranı, boru yarıçapı ve türbülans seviyesine bağlı olarak 10 – 50 m / s den ses hızına kadar yükselebilmektedir. detonasyonda ise ortaya çıkan yanma dalgası ses hızının üzerindedir [1]. Yani bir detonasyon dalgası, sıcaklık ve basınç gibi termodinamik durumların hızlı bir şekilde arttığı bir süpersonik yanma dalgasıdır [2]. Yanma eksplozyon kadar hızlı oluşur. Burada bir ucu açık tüpte bulunan reaktif karışım kapalı uç tarafından tutuşturulunca 1 – 3,5 km/s hıza sahip detonasyon dalgası meydana gelebilmektedir [1].

1.DETONASYON DALGASI

Detonasyon dalgası basit bir kıvılcımla başlayarak ses altı hızda ve düşük enerjide meydana gelir. Yakıt-oksitleyici daha büyük bir parlama için başlangıçtaki parlamanın hemen çevresinde toplanmıştır [3]. Isı ve enerji ile ivmelenen karışım, birbiriyle kesişerek birçok patlama alanı meydana getirir.

Bu patlama alanları yönlendirilerek yeni patlama alanları meydana getirmesi için ani dalga pikleri ve basınç artışları meydana getirir ve böylece detonasyon oluşmaması için hiçbir sebep yoktur. Yüksek hızlarda olan parlama sonunda detonasyon halini almıştır ve donuk patlama durumundadır. Bahsedilen bu "Donuk patlama" şöyle izah edilebilir; yakıt-oksitleyici çok hızlı bir dalgayla karşılaşır ve patlama sırasında hareket edemeden, sonra gelen dalganın etkisinde kalır. Detonasyon şok dalgası patlamanın ardından ani olarak yakıt-gaz karışımını sıkıştırarak yüksek sıcaklık ve basınçlarda biriktirdiği enerjiyi açığa çıkaracaktır. Serbest kalan bu ısı ve enerji şok dalgasından hemen sonra meydana gelecektir. Bu olayda meydana gelen basınç detonasyon dalgasını ileri hareket ettirecektir ve böylece önündeki dolguyu tetikleyecek ayrıca detonasyon motoru için bir süreklilik meydana gelecektir. [3].

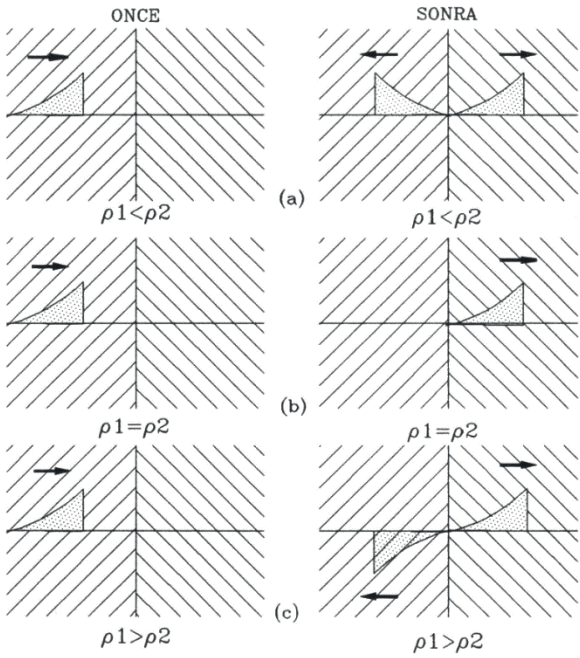
1.1. Detonasyon Dalgasının Davranışı

Şok dalgası altındaki reaktif aktif maddelerle parlamanın etkileşimi şok sıkıştırma tarafından indüklenen parçacık hızı, alevin yayıldığı reaksiyona girmemiş akışın Reynolds sayısını da artırır. Yüksek Reynolds sayısında akış, türbülanslı yapılardan dolayı yanma hızında ve enerji salınım oranındaki artışlarla birlikte laminerden türbülans halini alacaktır [3]. Yansıyan şok dalgası ile parlamanın etkileşimi Yansıyan şoklar, alevin gerilmesini ve bozulmasını doğuran Rayleigh-Taylor ara yüzü kararsızlığına sebep olan alevle etkileşimde ve şok ile alev etkileşimi sınırlı durumlarda bulunur. Alevin yüzey alanı arttıkça enerji salınım hızı artar ayrıca alev hızlanır ve artan Reynolds sayısı ile birleşen çarpık akış alanı, alevi daha da hızlandıran türbülansa yol neden olur [3].

Engeller, akışın kinetik enerjisinin bir kısmını büyük ölçekli türbülans haline çevirir. Büyük ölçekli türbülanslı yapılar alev yüzey alanında daha da büyük artışları meydana getirir. Daha küçük ölçekli olanlar, moleküler düzeyde türbülanslı karıştırma yoluyla türleri ve termal taşıma olaylarını iyileştirir ve böylece enerji salınım hızında ve etkin alev yayılma hızında bir artış meydana gelir [3].

Şok dalgası gaz gibi "hafif" bir ortamdan geçip düz bir katı yüzeye çarparsa aynı formda geriye doğru yansır ve yoğun bir ortamda ilerleyen şok dalgası ortam ile bitişik olan hafif bir ortamın yüzüne erişirse geriye doğru genleşme dalgası şeklinde yansır. Şekil 1'de gösterilmiştir [1].

Şok dalgası hafif ortama gelip geçerse ve düz katı yüzey üzerine çarpınca aynen geriye yansır. Yoğun ortam içinde şok dalgası ilerliyorsa bu ortama sınır yüzeye çarparsa geriye genleşme dalgası olarak yansır. Muhtelif ortamlarda durumlar Şekil 1'de gösterilmiştir [1].



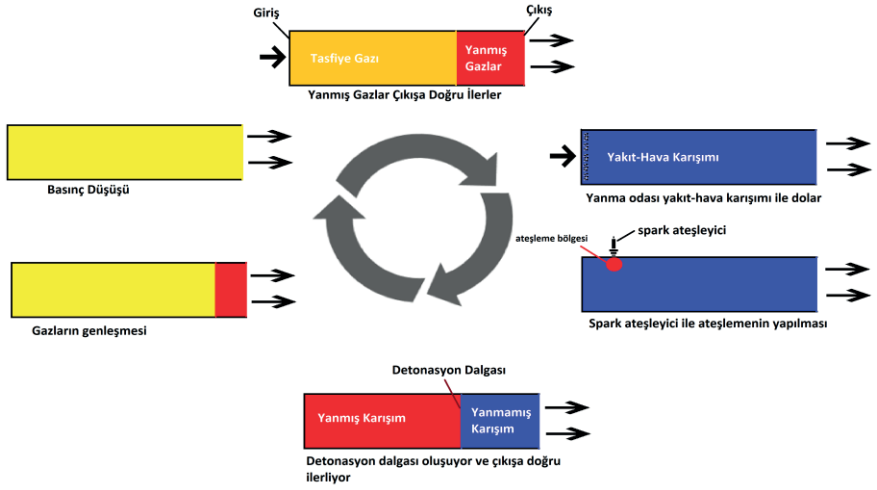
Şekil 1. Farklı akustik özellikleri olan bir ortamda ilerleyen şok dalgasının meydana getirdiği durumlara ait görünüşler [1].

1.2. Detonasyon Motorları

Detonasyon motorları Zeldovich-von Neumann-Döring esasına göre çalışır. Zeldovich-von Neumann-Döring modeli tek boyutludur burada detonasyon dalgasının sabit olduğu varsayılır ayrıca detonasyon dalgasını izleyen şok dalgası ses altı hızda bulunur.

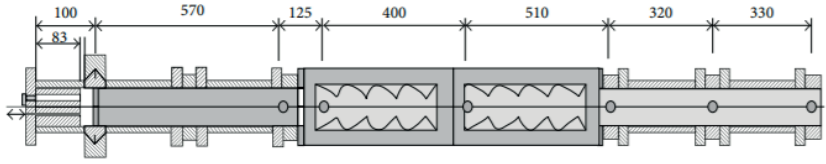
Genel olarak iki çeşit detonasyon motoru kullanılır, bu motorlardan biri puls detonasyon motoru diğeri ise dönel detonasyon motorudur. Detonasyon dalgası, puls detonasyon motorlarında bir tüpde, tüpün çıkış yönünde eksenel olarak hareket eder, dönel detonasyon motorlarında ise yanma odasında sürekli dönme hareketi yapar, dönel detonasyon motorlarında yanma odasının yapısı halka şeklindedir [4].

Puls motorunda önce yakıt-oksitleyici karışımı doğru kimyasal oranlarda enjektörler tarından yanma odasına püskürtülür. Yanma odasındaki bu karışım buji vasıtasıyla ateşlenir. Yanma odasında yanmaya başlayan yakıt-oksitleyici karışımı yanma odası çıkışına doğru hareket eder. Yanma olayı ile birlikte ısı, basınç ve düzensizliğin olduğu bir patlama alanına geçilir. Bahsedilen bu alanda düzensizlik ve koşullar uygunsa patlama aniden ses altı hızdan ses üstü hıza dönüşür böylece detonasyon dalgası meydana gelir. Yukarıda açıklanan puls detonasyon motorunun çalışması ile ilgili şema şekil 2'de verilmiştir.



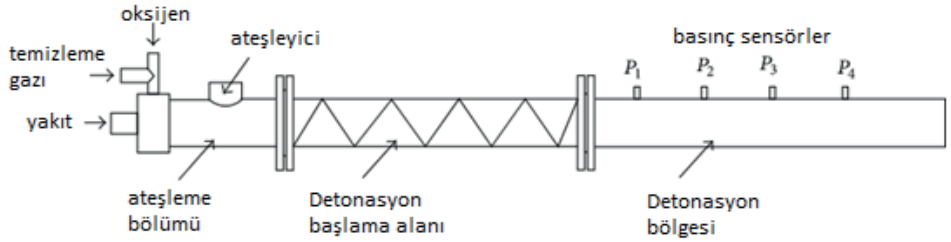
Şekil 2. Puls detonasyon motor döngüsü [4]

Oluşan bu detonasyon dalgasının sönmeden ilerleyebilmesi için geometrik ve kimyasal parametrelerin süreci ilerletmek adına uygun aralıkta olmalıdır. Türbülans seviyesi yanma odasında yer alan engeller vasıtasıyla artırılır [3,4]. Engelleri ifade edebilmek için en çok kullanılan sistemlerden biri şekil 3'te gösterilmiştir. Burada engellere belirli aralıklar verildiği görülmektedir.

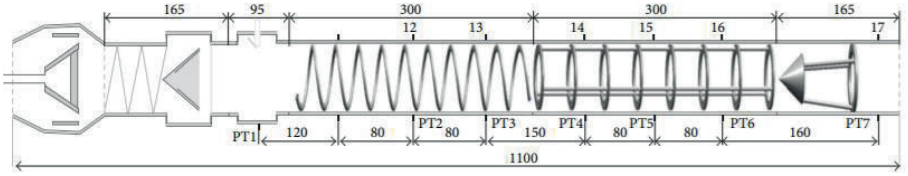


Şekil 3. Düzenli engelleri olan bir puls detonasyon motoru [3].

Detonasyon olasılığını artıran sistemlerden diğeri ise şekil 4'te gösterilmiştir, burada bir yay kullanılmıştır. Bu yay "Shchelkin yayı" olarak isimlendirilir. Bu yayın görevi detonasyon oluşumunu artırmaktır. Ayrıca hem yayın hem de engellerin bulunduğu sistem ise şekil 5'te verilmiştir.

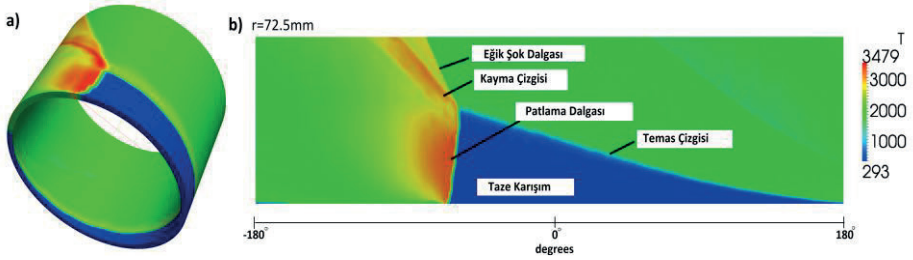


Şekil 4. Shchelkin yayı kullanan puls detonasyon motoru [3].



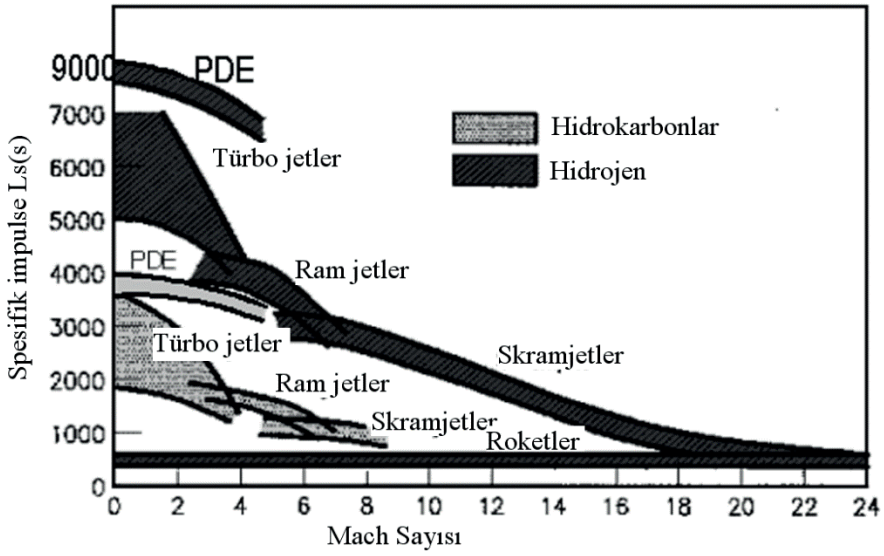
Şekil 5. Shchelkin yayı ve engelleri olan puls detonasyon motoru [3].

Dönel detonasyon motorları, puls detonasyon motorlarına göre daha çok tercih edilir. Dönel detonasyon motorunun popüler olmasının nedeni sürekli itki elde edilmesidir, puls detonasyon motorlarındaki gibi itki kesikli değildir ayrıca dönel detonasyon motorlarında çalışma frekansı puls detonasyon motorlarına göre daha yüksektir. Şekil 6'da dönel detonasyon motoruna ait sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Dönel detonasyon motorunda yakıt-oksitleyici karışımı yanma odasına yeterli miktarda yanma odasına püskürtülmelidir aksi durumda yetersiz karşım detonasyon dalgasının sönmesine sebep olur. Detonasyon dalgası halka yanma odasında dönmektedir [4]



Şekil 6. Dönel detonasyon motorunda sıcaklık dağılımı [4]

Hem puls hem de dönel detonasyon motorlarında detonasyon dalgası sabit hızla hareket eder. Bahsedilen detonasyon hızı, Chapman-Jouget hızı olarak ifade edilir [2].



Şekil 7. Puls detonasyon motorlarını diğer motorlarla karşılaştırması [1]

2. ŞOK DALDASI

Doğal ve yapay fiziksel olayların çoğunluğu sok dalgaları ile ilgilidir. Süpersonik bir uçağın seyrini örnek verecek olursak, ekplozyonlarda veya volkanik intifalarda sok dalgaları cereyan etmektedir. Bir şok dalgası, büyük miktardaki bir enerjinin yüksek hızla serbest kalması sonucu oluşan çok dik bir basınç artışı ile izah edilebilir. Bu enerji sürekli bir şekilde salınmıyorsa,

basıncı tekrar ortam değerine getiren daha yumuşak formda olan bir genleşme dalgası şoka eşlik edecektir ve şok dalgası bir akışkan ortamda cereyan edebilmektedir ayrıca ortamın özelliklerinde ani bir degisik1ik veya süreksizlik seklinde açıklanmaktadır. Bahsedilen süreksizlik ortam içinde değişmeden yayılır. Ses dalgası basınç pulsları ile oluşmaktır ve basınç pulsları çok küçük genlikteyse hız ortama ait karakteristik bir sabit değere sahip olacaktır. Basınç pulsları büyük genlikte ise hız artar ve dalga süpersonik bir hızla ilerler. Ortama verilen sinüzoidal tedirginlik, zaman geçtikçe, ön tasrafı dikleşen ve arka tarafı yatıklaşan bozulmuş bir basınç dalgası meydana getirir [5].
Şok dalgası şöyle izah edilebilir; akışkandaki yerel ses hızından çok daha hızlı bir dalgadır. Şok dalgası, normal bir dalga gibi enerji taşır ve bir ortam aracılığıyla birlikte yayılır bununla birlikte basıncın, sıcaklığın ve ortamın yoğunluğunda ani ve süreksiz bir değişim ile ifade edilir. Biz eğik Şok dalgasına bakıldığımızda; eğik şoklar genellikle süpersonik akımın kendi içine döndüğü yerlerde oluşur ve normal şok eğik şokun bir özel hali olduğunu ifade edebiliriz. Bu eğik şok dalgasını geçerken Mach sayısı azalmakla birlikte akım ses altı rejime düşmez. Basınç, sıcaklık ve yoğunluk ise artar. Ekserji, Termodinamik sistemin enerji potansiyelinin, seçilmiş referans durumuna göre kullanılabilirliğinin göstergesi olarak izah edilir ve ekserji eğer sistem çevre ile denge haline gelmişse, oluşan entropiden dolayı kullanılmayan enerji çıkarılırsa elde edilebilecek en büyük faydalı iş miktarı şeklinde de ifade edilebilir. Ayrıca sistem enerjisinin entropiden arındırılmış enerji olarak da açıklanabilir [5].

Enerjinin verimli kullanımı ve üretimi günümüz Dünya'sının en önemli sorunlarından biridir. Fosil yakıtların verimli kullanımı, kojenerasyon (aynı anda güç ve ısı üretimi), trijenerasyon (aynı anda güç, soğutma ve ısı üretimi) ve optimizasyon ile enerjinin kullanımı ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır [6, 7, 8, 9, 10]. Bunların yanında iki çevrimin beraber çalıştığı ve güç ürettiği kombine çevrimler ve performanslarının geliştirilmesi de ilgi çekmektedir [11]. Kriyojenik çevrimler, yenilenebilir yakıtlar ile sıfır emisyonlu çevrimler literatürde ilgi çeken ve güncel çalışmalara konu olan araştırma alanlarıdır [12, 13, 14, 15].

Belirli bir çevredeki bir hal içindeki kütleden faydalanılabilecek maksimum yararlı işe ekserji denir. Sistem ya da kütle ölü halde ise, çevresi ile

termodinamik denge halindedir. Enerjinin yararlı parçası ekserji, yararsız parçası da anerji ile tanımlanmaktadır.

Enerji = Ekserji + Anerji

Sisteme giren toplam enerji (E_g) – Sistemden çıkan toplam enerji ($E_ç$) = Sistemin toplam enerjisindeki değişim (ΔE_{sistem})

$$E_g - E_ç = \Delta E_{sistem}$$

Termodinamiğin 1. yasası, enerjinin niceliği 2. Kanun ise enerjinin niteliği ile ilgilidir.
Bir sistem sınırındaki sıcaklık, *dQ* sonsuz küçük hal değişimi için sistem ile çevre arasında ısı alışverişi de olacak şekilde olan tersinir bir hal değişimi için entropi değişimi

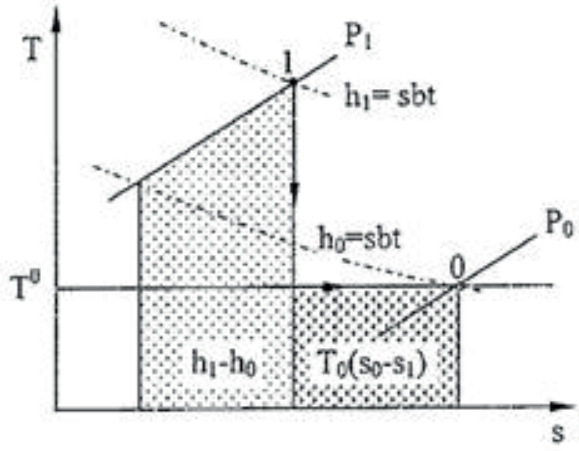
$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \left(\frac{\partial Q}{T}\right) t_r \qquad [16,17]$$

Tersinir adyabatik hal değişiminde ısı geçişi olmadığından, entropi değişimi de sıfır olmaktadır.

$$s_2 - s_1 = 0$$

2.1.Fiziksel ekserji

Bir kontrol hacminde giriş hali P_1 basıncı ve T_1 sıcaklığı, çıkış hali de çevre haline denk gelen P_0 basıncı ve T_0 sıcaklığında ise birim kütleden geçen ısı miktarı:



Şekil 8. Verilen bir durum ile çevre arasındaki fiziksel ekserji [16].

$(q_o)_{ter=}\ T_0(s_0 - s_1)$

Kontrol bölgesinde kararlı akış için enerji denklemi de:

$(q_o)_{ter}\ = -(W)_{ter=} T_0(h_e - h_1)$ [16,17]

Fiziksel işlemlerde iki farklı hal için fiziksel ekserji farkı;

$\varepsilon_{Fiz1} - \varepsilon_{Fiz2} = (h_1 - h_2) - T_0(s_2 - s_1)$

$\bar{S}(T_2, P_2) - \bar{S}(T_1, P_1) = \int_1^2 \frac{\bar{c}_{P_0}(T)}{T}\ dT - \bar{R}\ \ln p2/p1$

$\bar{S}(T_2, v_2) - \bar{S}(T_1, v_1) = \int_1^2 \frac{\bar{c}_{v_0}(T)}{T}\ dT - \bar{R}\ \ln \frac{v2}{v1}$ [16,17]

Özgül ısılar (ortalama bir sıcaklık için) sabit farzedilirse ideal olan gazlarda tersinir adyabatik hal değişimi;

$k = c_{p_0}/c_{v_0}$

$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1}$

$$P.v^k = T.v^{k-1} = T.P^{\frac{(k-1)}{k}} \quad [16,17]$$

İdeal gaz karışımlarında fiziksel ekserji molar cinsten şöyle yazılabilir.

$$e_{Fiz} = \left(\bar{h} - \bar{h}_0\right) - T_0.(s - s_0) = \int_{T_0.}^{T.} \bar{C}_{p_0}(T)dT - T_0.(\int_{T_0.}^{T} \frac{c_{P_0}(T)}{T} dT - \bar{R} \ln p_i / p_0)$$

$$e_{Fiz} = \left(\bar{h} - \bar{h}_0\right)_{kar} - T_0.(s - s_0)_{kar} = \sum_i X_i (\int_{T_0.}^{T.} \bar{C}_{p_{0i}}(T)dT - (\int_{T_0.}^{T} \frac{c_{P_{0i}}(T)}{T} dT - \bar{R} \ln p_i / p_0)$$

Gaz karışımlarının kimyasal ekserjisi;

$$\bar{e}_{k_{im,kar}} \sum_i x_i . \bar{e}_{kim,i} + \bar{R}.T_0 \sum_i x_i . \ln x_i$$

Burada bir akış ya da kontrol kütlesinde toplam ekserji;

$$\bar{E} = \bar{E}_{Fiz} + \bar{E}_{kim}$$

Zamandan bağımsız olan giren çıkan kütlesi eşit açık sistemlerde ekserji denklemi;

$$\sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_i \dot{T}_0 S_i - \sum_j \dot{m}_j h_j + \sum_j \dot{T}_0 h_j + \sum_i \dot{Q}_k - \sum_i \dot{Q}_k \frac{T_0}{T_k} - \dot{W} = \dot{E}_{KAYIP}$$

Sistemin 2. kanun verimi elde edilen ekserjinin verilen ekserjiye oranıdır

$$\dot{E}_{KAYIP} = T_0[\sum_j \dot{S}_j - \sum_i \dot{S}_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}]$$

$$\eta_{ekver} = \frac{Elde\ edilen\ ekserji}{Beslenen\ ekserji} \quad [16,17]$$

Tablo 1. Çeşitli Maddelerin Bazı Hallerdeki Standart Kimyasal Ekseriler [16]

Madde	**Faz**	**Mol ağırlığı (kg/kmol)**	**Standart kimyasal ekserji (kJ/kmol)**
Ag	Katı	107,8	73730
Al2O3	Katı	101,9	204270

CO2	Gaz	44	20140
H2O	Gaz	18	11710
H2O	Sıvı	18	3120
CH4	Gaz	16	836510
C8H18	Sıvı	114	5440030

Bir Mol hidrokarbon CαHβ'nin diyatomik oksijen O2 ile tam yanması için:

$$C_\alpha H_\beta + \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right) O_2 \rightarrow \alpha CO_2 + \frac{\beta}{\alpha} H_2O$$

$$W_{rev} = \xi_{ch} = \mu_{C_\alpha H_\beta} + \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right) \mu_{CO_2} - \alpha\mu_{H_2O} - \frac{\beta}{2}\mu_{H_2O} \qquad [16,17]$$

Burada W_{rev} yakıtın molü başına maksimum tersinir iş, ξch yakıtın molü başına kimyasal ekserji ve μ kimyasal potansiyellerdir. Gaz halindeki hidrokarbonlar için kimyasal ekserji ξch ve LHV arasındaki yaklaşık bir ilişki;

$$\frac{\xi_{ch}}{LHV} \cong 1.033 + 0.0169\frac{\beta}{\alpha} - \frac{0.0698}{\alpha} \qquad [16,17]$$

2.2.Normal şok dalgaları ekserji analizi.

Süpersonik akışlarda ve karşı basınç noktalarında, yakınsak ıraksak lülelerin ince olan bölümünde akışkanda şok dalgası oluşturan ani değişiklikler olur. Şok dalgasında akış yüksek oranda tersinmezdir. Şimdi şok dalgasındaki denklemleri inceleyelim,
Normal şok dalgasından geçen akım için;
Kütlenin korunumu;

$$\rho_1 AV_1 = \rho_2 AV_2$$

Enerjinin korunumu için;

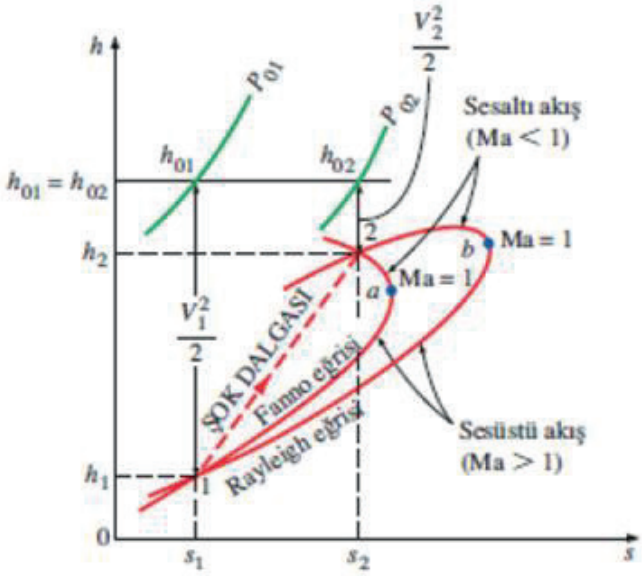
$$h_{01} = h_{02}$$

Momentumun korunumu;

$$A\,(P_1 - P_2) = \dot{m}(V_2 - V_1)$$

Entropi artışı;

$$s_2 - s_1 \geq 0 \qquad [16,17]$$



Şekil 9. Fanno ve Rayleigh eğrisi [16].

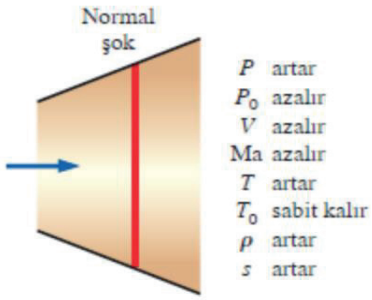
Fanno eğrisi, enerji ve kütlenin korunumu denklemleri tek denklem haline getirildiğinde ve h-s diyagramı üzerinde özellik bağıntıları kullanılarak çizildiğinde oluşan eğridir. Fanno eğrisi de aynı kütle akışına ve durma entalpisine sahip hallerdeki geometrik yeridir.
Rayleigh eğriside, momentumun ve kütlenin korunumu denklemleri tek denklem haline getirilip h-s diyagramı üzerinde çizildiğinde oluşan eğridir.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \frac{P_2 M_{a_2} c_2}{P_1 M_{a_1} c_1} = \frac{P_2 M_{a_2}\sqrt{T_2}}{P_1 M_{a_1}\sqrt{T_1}} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2 \left(\frac{M_{a_2}}{M_{a_1}}\right)^2$$

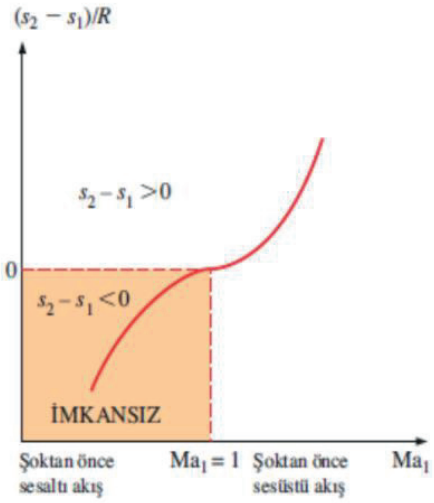
$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{M_{a_1}\sqrt{1+{M_{a_1}}^2\,(k-1)/2}}{M_{a_2}\sqrt{1+{M_{a_2}}^2(k-1)/2}}$$

$${M_{a_2}}^2 = \frac{{M_{a_1}}^2+2/(k-1)}{(2{M_{a_1}}^2k/(k-1))-1} \qquad [16,17]$$

Bu denklemler Rayleigh ve Fanno eğrilerinin kesişmesini gösterir.



Şekil 10. k =1.4 olan ideal gazda şok önü ile arkası akış özelliklerinin oranları ve normal şoktan geçişte akış özelliklerinin değişimi [16].



Şekil 11. Normal şokun önü ve arkası için entropi eğrisi [16].

$$S_2 - S_1 = C_p ln\frac{T_2}{T_1} - Rln\frac{P_2}{P_1} \quad [16,17]$$

KAYNAKLAR

[1] Yaşar, M., Kadı, İ. (2006). Bir Saf Detonasyon Motorunun Su İçerisindeki Tepkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Gazi Üniv. Müh. M.m. Fak. Der. Cilt 21, No 3,457-466.

[2] John H. S. Lee. (2008). The Detonatıon Phenomenon. McGill University.

[3] Bulut A. C. (2022). Darbeli Detonasyon Motoru (DDM) ile Farklı Konfigürasyonlarda Detonasyon Dalgası Oluşturma. İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı Enerji Bilim ve Teknoloji Programı Yüksek Lisans Tezi.

[4] Yelken Ü. (2019). Dönel Detonasyon Motorlarında Eşlenik Isı Transferi Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı Uçak ve Uzay Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi.

[5] Kadı, İ. (1992). Detonasyon olaylarının bilgisayar destekli ölçme ve analizi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi.

[6] Karaali, R., Öztürk, İ. Performance Analyses of Gas Turbine Cogeneration Plants J. of Thermal Science and Technology (Isı Bilimi ve Tekniği Der.), V:37 (2017), No. 1, p. 25-33.

[7] Karaali, R., Keven, A. (2022). Exergy Analysis of Inlet Air Absorption Cooling Effects on Basic Cogeneration Systems. European Journal of Science and Technology. 43;97 – 103.

DOI: 10.31590/ejosat.1199382

[8] Karaali, R., Öztürk, İ. Effects of Ambient Conditions on Performance of Gas Turbine Cogeneration Cycles, J. of Thermal Science and Technology (Isı Bil.veTek.Der.), V.37 (2017), No. 1, p. 93-102.

[9] Karaali Rabi. Investigation of Inlet Air Pressure and Evaporative Cooling of Four Different Cogeneration Cycles. Open Chemistry, vol.20,no:1,pp:1632 - 1642, 2022

[10] Karaali, R., Keven, A. (2022). Performance Analysis of Air Fuel Heating Effects on Cogeneration cycles. European Journal of Science and Technology, 43;91 – 96. DOI: 10.31590/ejosat.1199414

[11] Karaali Rabi. Performance Analyses of Combined Cycle Power Plants. IJCESEN, vol.9, no:2, pp:165 - 169, 2023

[12] Atasbak, M., Karaali, R., Keven, A. Exergy analyses of two and three stage cryogenic cycles. *Applied Rheology,* 32;194 – 204. 2022. DOI:10.1515/arh-2022-0134

[13] Keven, A., Karaali, R. (2022). Analysis of Some Tribological Properties of Hazelnut Oil in Gasoline engines. *Erzincan University Journal of Science and Technology*.15;75–83.

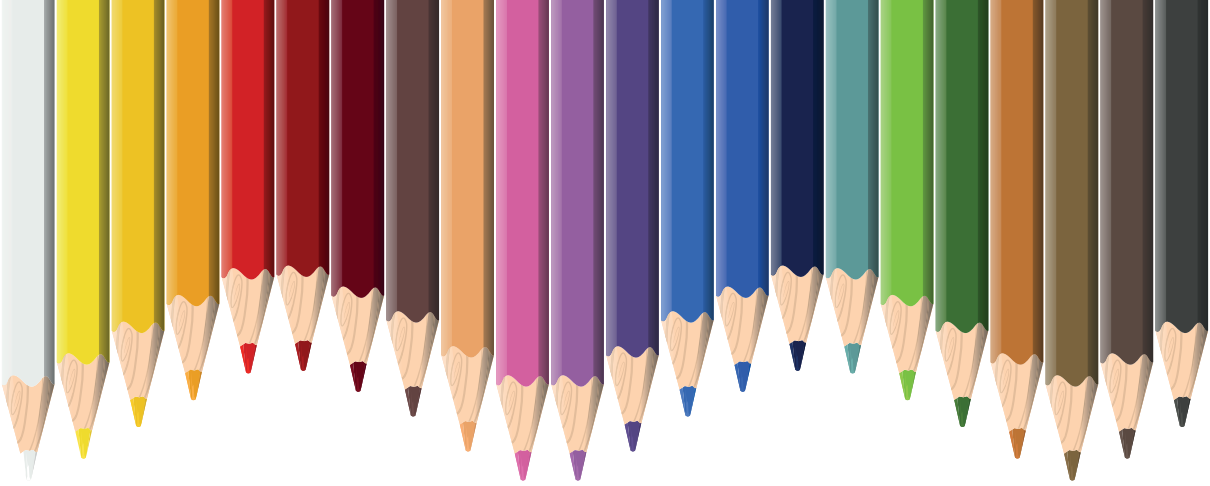
DOI:10.18185/erzifbed.1199745

[14] Keven, A., Karaali, R. (2015). Investigation of an Alternative Fuel for Diesel Engines. *Acta Physica Polonica A*, 128(2B);282 – 286. DOI:10.12693/APhysPolA.128.B-282

[15] Karaali, R., Öztürk, İ. Thermodynamic Optimization of a Zero CO_2 Emission Cogeneration Cycle. Fresenius Environmental Bulletin, Volume 25, No. 12a/2016, pages 5729-5738

[16] Çengel YA, Boles MA. (2021) Mühendislik yaklaşimiyla termodinamik. Palmiye Yayınevi, Ankara Turkiye.

[17] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. Thermal design and optimization. Danvers, Massachusetts: Wiley Pub; 1996.



Bölüm 11

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN ÜRETİM PERFORMANS ANALİZİ VE KAMU KURUMLARI İÇİN SANTRAL ÖRNEĞİ

Samet Giray TUNCA[1]

Kadir OLCAY[2]

Mustafa Arif ÖZGÜR[3]

1 Öğr.Gör. Kadir OLCAY, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi ORCID: 0000-0001-7918-6482

2 Öğr.Gör. Samet Giray TUNCA, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi ORCID: 0000-0002-7632-8745

3 Prof.Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi ORCID: 0000-0001-5877-4293

1. Güneş Enerjisi

Enerji kavramı günümüzde temel ihtiyaçlardan biri haline gelmiştir. Gün geçtikçe enerji talebi artışı birçok faktöre bağlı olarak artmaktadır. Bu artışın ana nedenleri olarak nüfus artışı, ekonomik büyüme, şehirleşme, teknolojik ilerleme ve endüstriyel aktiviteler olarak sıralanabilir.

Enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtların çevresel etkileri bulunmaktadır. Sera gazlarının atmosfere salınımı iklim değişikliğine sebep olmakta, bununla birlikte biyolojik yaşamı olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle giderek artan enerji ihtiyacının karşılanması için yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi önemlidir.

Dünyada ve ülkemizde artan enerji ihtiyacına karşın yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanma imkanları giderek artmaktadır. Artan enerji maliyetlerine rağmen fosil yakıtların yerine tercih edilen yenilenebilir enerji kaynakları çevresel faktörler açısından değerli görülmektedir.

Sonsuz bir enerji kaynağı olarak bilinen güneş, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en yaygın kullanılanlardan biridir. Birçok sektörde enerji ihtiyacının karşılanması için kullanılan güneş enerji santralleri hem sanayide hem de kırsalda enerji talebinin karşılanmasında kullanılmaktadır. Enerji maliyetlerinin artması enerji sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarına dönüşümünü hızlandırmıştır.

Güneş enerji sistemlerinden üretilen enerji miktarı bazı parametrelere göre değişmektedir. Güneş paneli türü, coğrafi konum, panel açısı, kirlenme faktörü gibi parametrelerden söz edilebilir.

Fotovoltaik (FV) hücreleri, güneş ışığını kullanarak fotoelektrik olayıyla enerji üreten yarı iletken cihazlardır. İlk FV modülü, Bell laboratuvarında 1954 yılında geliştirilmiştir. Bu teknolojinin uzay endüstrisindeki kullanımı 1960'lı yıllara dayanmaktadır ve daha sonra 1970'li yıllardaki petrol kriziyle birlikte güç sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Güneş enerji santralleri ile ilgili yapılan birçok çalışma bulunmaktadır.

Güneş panellerinde sıcaklığın artması verimi düşürdüğü bilinmektedir. Yapılan deneysel bir çalışmada güneş panellerinin arka yüzeyine yerleştirilen borular ile soğutulması sonucunda elektrik üretiminde %35'lik bir artış sağlandığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda sıcak su temini gerçekleştirilmiştir. (Duran & Kabul, 2014).

Elazığ'da bulunan güneş enerji santralinin 2018 yılı ilk altı ayındaki veriler ile performans analizi yapılmıştır. Santralin kurulu gücü 1036,8 kWp olup, her dizide 20 panel olacak şekilde 192 dizi panel bulunmaktadır. PVsyst programı kullanılarak elde edilen simülasyon verileri ile saha verileri karşılaştırılmış ve %4,52'lik bir fark tespit edilmiştir (Tanış & Altıntaş, 2023).

Dal (2021) tarafından yapılan çalışmada panellerin aylık, mevsimlik ve altı aylık performansları ile optimum eğim açısının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Sabit 29,50'lik eğim açısı ile kurulu olan paneller, her ay optimum eğim açısı ile konumlandırılması sonucunda verim artışı sağlanmıştır. Aylık olarak %4,11, mevsimsel olarak %3,25 ve altı aylık %2,99 verimde avantaj sağlanmıştır. Bu veriler değerlendirildiğinde güneş panellerinin yılda iki kez (altı aylık) eğim açısını değiştirerek konumlandırmasının uygun olacağını gösterilmiştir (Dal, 2021).

Dört kişilik bir ailenin yaşadıkları konutun ortalama elektrik tüketimi hesaplanarak, Bursa ve Karaman illerinde kurulacak güneş enerji santralinin amortisman süresi hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada yıllık elektrik üretim kapasiteleri Bursa'da 6187,5 kWh, Karaman'da 7575,7 kWh olarak hesaplanmıştır (Adalı, Dönmez, & Yalılı Kılıç, 2021).

Elektrik tüketiminin karşılanmasında kullanılacak olan başka bir sistem Balıkesir'in Erdek ilçesi için HOMER programı ile tasarlanmıştır. Hibrit sistem olarak düşünülen tasarım şebeke bağlantılı ve bağlantısız olarak değerlendirilmiştir. Şebeke bağlantısız sistem emisyon açısından diğer sisteme göre yüksek değerleri olsa da, maliyet açısından kabul edilebilir bir tasarım olduğu tespit edilmiştir (Mete & Güven, 2021).

Araçlardaki enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji ile karşılanmasıyla ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bu örnek çalışmalardan birinde güneş ve rüzgar enerjisinden yatlarda faydalanma hakkında bilgiler verilmiştir. Günlük enerji ihtiyacının bu yöntemler ile karşılanabileceği açıklanmıştır. (Kaplan & Kükner, 2017).

Bursa ilinde kurulması düşünülen 23 kW'lık güneş enerji santralinde kullanılması planlanan monokristal ve polikristal güneş panellerinin teknik ve ekonomik karşılaştırmaları yapılmıştır. Monokristal fotovoltaik panellerden elden edilecek yıllık enerji üretimi polikristal panellere göre yaklaşık %2 oranında daha yüksek çıkmıştır. Geri ödeme süreleri ise aynı hesaplanmıştır (Biçen & Vardar, 2022).

Yapılan diğer bir çalışmada ise günlük elektrik tüketimi yaklaşık 150000 kWh olan Muğla'nın Köyceğiz ilçesinde, elektrik tüketiminin şebekeden bağımsız hibrit sistemler tarafından karşılanması ile ilgili hesaplamalar yapılmıştır. Çevresel anlamda yenilenebilir ve sürdürülebilir olması bu sistemlerin olumlu tarafıdır (Poyraz & Güven, 2021)

Güneş panelleri ile ilgili teknolojinin gün geçtikçe ilerlemesi ile farklı panel yapılarının üretilmesini sağlamıştır. Çalışmada tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaik panellerin (FV) performanslarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Tek yüzeyli panellerin ortalama %82,21 performans oranıyla yılda 1537 kWh, çift yüzeyli panellerin ortalama %93,06 performans

oranıyla yılda 1740 kWh üretim potansiyeline sahip olduğunu belirtilmiştir (Acır, Çinici, & Bayyiğit, 2023).

Ankara ilinin Polatlı ilçesinde şebekeden bağımsız güneş-rüzgar hibrit enerji sistemi fizibilite çalışması yapılmıştır. Tasarımı yapılan santralden elde edilecek elektrik enerjisinin %58,2'si rüzgar türbininden, %41,8'i ise güneş enerjisinden elde edileceği hesaplanmıştır. Bu santralin kurulması ile atmosfere salınacak CO_2 emisyonunun yılda 17358 kg olacağı ve yatırımın 9 yılda amorti edileceği tespit edilmiştir (Akan & Akan, 2021).

Diğer bir hibrit çalışmada şebekeye bağlı fotovoltaik (FV) güneş enerjisi sistemi, akü ve dizel jeneratörden oluşan bir sistem tasarlanmıştır. Elde edilen veriler neticesinde yapılan hesaplamalar ile önerilen hibrit enerji üretim sistemi ile fabrikanın elektrik ihtiyacı kesinti olmadan güvenilir şekilde sağlanabilecektir (Tabak, 2021).

Düzce üniversitesinde çatı güneş enerji santralinin 6 yıllık verileri analiz edilmiştir. Bu veriler ışığında sistemde kullanılan amorf silisyum (a-Si), polikristal silisyum (p-Si) ve mono kristal silisyum (m-Si) fotovoltaik paneller içerinde en verimli olanının m-Si fotovoltaik paneller olduğu tespit edilmiştir **(Tüzün Özmen & Özdemir, 2023)**.

Diğer bir çalışma güneş panellerinin temizlenmesi sonrasında enerji üretimindeki artıştan bahsedilmiştir. Temizleme sonrasında panel çıkış voltajında &8,02, akımında ise %18,78 artış olduğu tespit edildiği ifade edilmiştir. (Park, Park, Öztürk, & Khan, 2019).

Geliş ve diğerleri çalışmalarında fotovoltaik panelin yapay ışık kaynağı ile mesafesinin ve panel açısının etkilerini değerlendirmişlerdir. Mesafe ve açı arttıkça güneş paneli veriminin düştüğünü tespit edilmiştir **(Geliş, Akyürek, & Yoladı, 2020)**.

Güneş enerji sistemlerinin çatı uygulamaları oldukça yaygındır. Almanya ve İtalya gibi ülkelerde güneş enerji santrallerinin %50 si çatılarda bulunmaktadır. Ülkemizde güneydoğu Anadolu ve akdeniz bölgesi çatı güneş enerji kurulumlarında en önde gelen bölgelerimizdir. **(Taşçıoğlu & Keser, 2019)**.

Güneş enerji sistemlerinde yaşanan gelişmeler neticesinde bu çalışmada Kütahya ili Dumlupınar ilçesinde bulunan 9 kamu kuruluşunun elektrik tüketimlerinin, tasarımı yapılan güneş enerji santralinden karşılanması düşünülmüştür. Kamu kurumlarının enerji tüketimini optimize etme ve karbon ayak izini azaltma çabaları, güneş enerjisi santrallerinin entegrasyonu yoluyla önemli bir dönüşüm yaşamaktadır. Yapılan çalışmada Dumlupınar ilçesindeki kamu kurumlarının elektrik tüketim verileri kullanılmıştır. Kurumların 12 aylık enerji tüketimleri dikkate alınarak enerji tüketimleri belirlenmiştir. Santralin yıllık enerji üretimi ve bununla beraber CO_2 emisyon tasarrufu da hesaplanarak gösterilmiştir.

Çalışma yenilenebilir enerji kaynaklarından verimli bir şekilde yararlanılabileceğini ve sürdürülebilir bir enerji geleceğinin mümkün olduğunu göstermektedir. Kamu kurumlarında enerji güneş enerji teknolojilerinin uygulamalarının gerçekleştirilmesinin mümkün olduğu tespit edilmiştir.

2. GÜNEŞ PANELLERİ

Güneş enerji panelleri, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (FV) hücreleri içeren cihazlardır. Bu paneller, güneş enerjisini kullanarak elektrik üretmek ve bu elektriği daha sonra kullanmak üzere depolamak amacıyla kullanılır. Farklı panel çeşitleri bulunmaktadır.

Monokristalin paneller, tek bir kristal yapıdan yapılmıştır ve genellikle daha yüksek verimliliğe sahiptirler. Ancak üretim süreci daha maliyetlidir. Polikristalin paneller, birden çok kristal tane içerir ve genellikle daha uygun maliyetlidir. Ancak monokristalin panellere göre biraz daha düşük verimliliğe sahiptirler. İnce film paneller, genellikle esnek malzemeler üzerine ince bir tabaka halinde yapılır. Daha hafif ve esnek olmaları nedeniyle bazı özel uygulamalarda tercih edilebilirler.

Güneş panelleri ile ilgili yapılan çalışmada, hareketli panelin verimliliğinin sabit panelin verimliliğine oranının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir **(Gündoğdu, Kabadayı, & Öztürk, 2016)**.

Bir güneş panelindeki aerodinamik mekanizmalar ve eğim açısının önemi ile ilgili bir çalışma yapılmıştır (Yemenici, 2020). Enerji üretiminde panel açısından kaynaklanan azalmaları engellemek için servo motorlar ve Arduinio işlemcisi ile panelin güneş takibini yapan bir sistem tasarlanmıştır (Oral & Uçar, 2014). Güneş panelleri ile ilgili yapılan başka bir çalışmada güneşi takip eden sistem ile uygun açıdaki sabit sistemin karşılaştırılması yapılmıştır (Turmuş, 2018).

3. PANEL KİRLENME FAKTÖRÜ

Son on yılda, dünya genelinde güneş PV santrallerinin kurulu kapasitesinde sürekli bir artış gözlenmiştir. Enerji üretimi sahasında güneş enerjisinin payı artarken ve fotovoltaik malzemelerin verimliliğinde sürekli ilerlemeler kaydedilirken, bu PV sistemlerinin ilerlemeye devam etmesi son derece kritik bir konudur. Tesisler, varlıkları boyunca tutarlı ve güvenilir enerji dağıtımını sağlamak amacıyla maksimum tasarım kapasiteleriyle faaliyet göstermelidir **(Rao, Pillai, Mani, & Ramamurthy, 2014)**.

Ancak, sistem performansını etkileyen bir dizi faktör, güneş enerjisi santrallerini istenilen tasarım kapasitesinin altında çalışmaya yönlendirebilir. Bu faktörlerden biri, güneş panellerinin kirlenmesidir. Kar, kir, toz, yaprak, polen ve kuş dışkıları gibi unsurların panellerin yüzeyinde birikmesi, güneş fotovoltaik sisteminin verimini azaltır **(Jamaly, Juan, & Kleissl, 2013)**.

Enerji talebinin karşılanmasının sürdürülebilir olması önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarındaki en kritik konulardan birisi de sürdürülebilirliktir. Güneş enerji santrallerinde verimin sürekliliği kullanılan malzemeye, panel tipine, konumlarına, yönlerine ve çevresel etkilere bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Bu durumun önlenmesi veya azaltılması için düzenli bakım ve temizlik önemlidir. Panellerin düzenli olarak temizlenmesi, biriken kir ve döküntülerin temizlenmesini sağlayarak güneş ışığının panellere etkili bir şekilde ulaşmasını mümkün kılar. Ayrıca, bazı güneş enerjisi sistemlerinde otomatik temizlik sistemleri kullanılarak, kirliliğin etkileriyle mücadele edilebilir. Bu sayede, güneş enerjisi santralleri daha yüksek verimlilikle çalışabilir ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirilebilir. Yerel koşulların da kirlenme faktörü üzerinde etkisi olduğu unutulmamalıdır; bu nedenle, çevresel faktörlere uygun temizlik stratejileri belirlenmelidir.

4. TÜRKİYE'NİN ENERJİ POTANSİYELİ

Türkiye enerji potansiyeli bakımında önemli kaynaklara sahiptir. Bu sebeple enerji çeşitliliği politikaları desteklenmekte ve sürdürülebilir enerji üretimine odaklanılmaktadır. Bu çerçevede, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve hidroelektrik enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar önemli bir yer tutmaktadır.

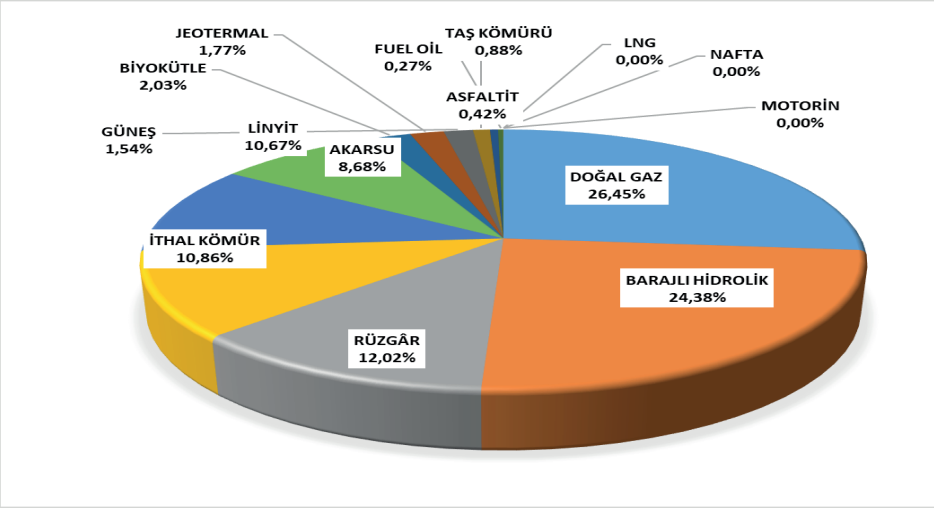
Tablo 1.'de 2022-2023 Haziran ayları arası Elektrik kurulu gücü ve miktarları verilmiştir. Yenilenebilir enerji oranının %44,64 olduğu görülmektedir.

Tablo 1. 2022 Haziran-2023 Haziran Elektrik Kurulu Gücü ve Üretim Miktarı (EPDK, 2023)

KAYNAK TÜRÜ	TOPLAM KURULU GÜÇ* (MW)				TOPLAM ÜRETİM* (MWh)			
	2022 HAZİRAN	ORAN (%)	2023 HAZİRAN	ORAN (%)	2022 OCAK-HAZİRAN	ORAN (%)	2023 OCAK-HAZİRAN	ORAN (%)
HİDROLİK	31.557,95	31,09	31.587,86	30,11	42.377.603,82	26,30	33.367.800,35	21,86
RÜZGÂR	10.978,51	10,81	11.565,80	11,03	16.745.615,75	10,39	15.822.658,36	10,37
GÜNEŞ	8.479,10	8,35	10.194,96	9,72	7.062.965,16	4,38	8.671.051,31	5,68
BİYOKÜTLE	1.776,17	1,75	2.031,05	1,94	4.413.863,94	2,74	4.709.695,94	3,09
JEOTERMAL	1.686,39	1,66	1.691,39	1,61	5.623.596,71	3,49	5.564.050,66	3,65
YENİLENEBİLİR	**54.478,12**	**53,67**	**57.071,06**	**54,40**	**76.223.645,39**	**47,30**	**68.135.256,62**	**44,64**
DOĞAL GAZ	25.670,21	25,29	25.753,95	24,55	31.821.680,46	19,75	30.813.349,27	20,19
İTHAL KÖMÜR	9.713,80	9,57	10.373,80	9,89	25.197.557,51	15,64	31.518.477,50	20,65
LİNYİT	10.138,52	9,99	10.191,52	9,72	22.729.123,66	14,10	19.560.601,15	12,82
TAŞ KÖMÜRÜ	840,77	0,83	840,77	0,80	1.563.397,84	0,97	1.530.722,39	1,00
ASFALTİT	405,00	0,40	405,00	0,39	876.960,48	0,54	760.281,02	0,50

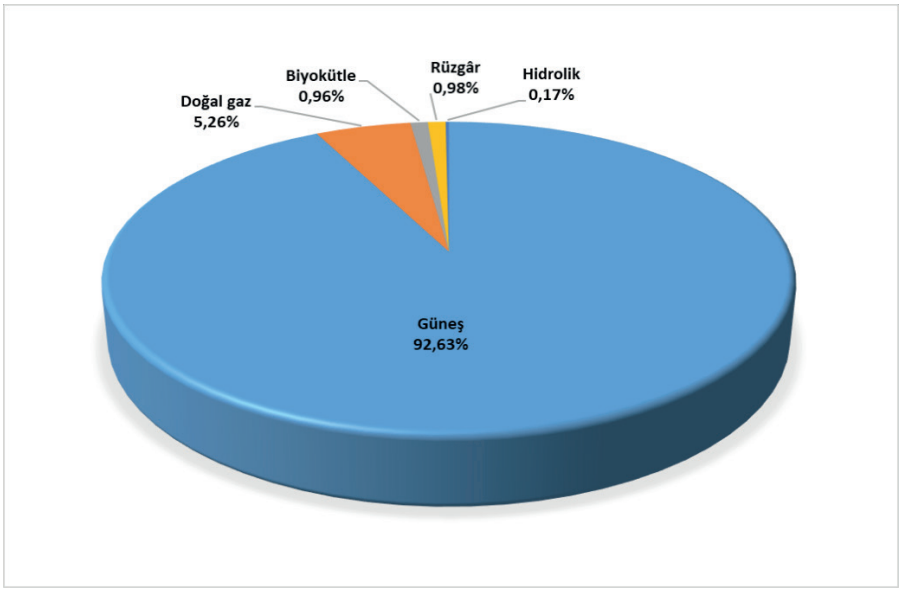
FUEL OİL	260,13	0,26	260,13	0,25	362.901,13	0,23	313.884,96	0,21
NAFTA	4,74	0,00	4,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LNG	1,95	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MOTORİN	1,04	0,00	1,04	0,00	2.384.717,99	1,48	0,00	0,00
TERMİK	**47.036,16**	**46,33**	**47.832,90**	**45,60**	**84.936.339,06**	**52,70**	**84.497.316,29**	**55,36**
TOPLAM	**101.514,28**	**100,00**	**104.903,95**	**100,00**	**161.159.984,45**	**100,00**	**152.632.572,92**	**100,00**

Lisanslı elektrik kurulu gücünün kaynak bazındaki değerler incelendiğinde güneş enerjisinden %1,54 oranında yararlanılmaktadır. Şekil 1. de 2023 yılı haziran ayı itibariyle Lisanslı Elektrik Kurulu Gücünün Kaynak Bazında Dağılımı verilmiştir.



Şekil 1. 2023 Yılı Haziran Sonu İtibariyle Lisanslı Elektrik Kurulu Gücünün Kaynak Bazında Dağılımı (%) **(EPDK, 2023)**

Lisansız elektrik kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı incelendiğinde güneş enerjisinin %92,63 gibi yüksek bir oranda olduğu Şekil 2.'de görülmektedir. Lisansız üretim kapasitesi sınırları içerisinde birçok alanda kullanıldığı ve kırsalda enerji ihtiyacının karşılanması için büyük bir alternatif olarak görüldüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 2. 2023 Yılı Haziran Ayı Sonu İtibariyle Lisanssız Elektrik Kurulu Gücünün Kaynaklara Göre Dağılımı (%) **(EPDK, 2023)**

5. GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİ KURULUM SÜRECİ

Elektrik enerjisi üretimi amaçlı kurulacak santraller temelde iki gruba ayrılabilir. Bunlar lisanlı elektrik üretim santralleri ve lisanssız elektrik üretim santralleridir. Lisanslı tesisler için "Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği" dikkate alınmalıdır. Lisanssız tesisler için "Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği"ndeki yükümlülükler geçerlidir.

Lisans yönetmeliğine göre usul ve esaslar ön lisans ve lisans sahiplerinin hak ve hükümlülüklerini belirlenmektedir. Elektrik piyasasında faaliyet gösteren tüzel kişiler bir tesis veya birden fazla tesiste faaliyet göstermek istemesi durumunda her tesis için ayrı lisans almak zorundadır. Bu yönetmeliğe bakıldığında aşağıdaki faaliyetlerde bulunmak isteyen tüzel kişilerin uygun lisansı alması zorunludur. Faaliyet alanları şu şekildedir:

- Üretimi
- İletimi
- Dağıtımı
- Toptan satışı
- Perakende satışı
- İthalatı
- İhracatı

Lisans alma zorunluluğu bulunmayan haller yine bu yönetmelikte tanımlanmıştır. İşlem süreci daha uzun ve görece zorlu olan bir sistem olarak söylenebilir.

Öz tüketime yönelik elektrik enerjisi üretimini teşvik eden lisanssız enerji üretim santralleri ikinci tür santrallerdir. Bu santraller lisans alma ve şirket kurma zorunluluğu olmadan gerçek veya tüzel kişilerin, enerji arz güvenliğini destelemek ve daha küçük üretim tesislerinin ülke ekonomisine destek sağlaması amacıyla oluşturulmaktadır. Bu çalışmada önerilen santral lisanssız elektrik santrali grubuna girmektedir. Bu santrallerin temel amacı enerji tüketicilerinin tükettikleri enerjiyi güneş enerjisi kullanarak üretebilmesidir. Lisanssız elektrik enerji santrali olarak kurulan güneş enerji santralleri (GES) kurulumu için enerji tüketimi gerekmektedir. Yani, enerji tüketimi olmadan GES kurulumu yapılamamaktadır. Örnek vermek gerekirse; elektrik enerjisi tüketimi bir önceki yılında 500.000 kWh olan bir tüketim tesisi, cari yılda aylık mahsuplaşmalar tamamlandıktan sonra satışa konu edilebilecek enerji üretim miktarı 500.000 kWh olacaktır. İlgili yönetmelik bu şekilde uygulanmaktadır. Kısaca kurulacak GES, tüketim tesisinin bir yıldaki elektrik enerjisi tüketiminin en fazla iki katı kadar enerji üretimi yapabilecektir. Verilen örnekte de bu açıklanmaktadır. Yine örnekteki enerji tüketimine sahip olan tesis cari yıldaki mahsuplaşmadan sonra 500 bin kWh 'den fazla enerji üretmesi durumunda bu üretim Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM)' na bedelsiz bir katkı olarak değerlendirilecektir.

Türkiye'de Lisanssız Güneş Enerjisi Santrali (GES) süreci genellikle aşağıdaki adımları içerir.

1. *Projelendirme ve İş Geliştirme*

- İlk aşamada, GES kurulumu yapılacak tüketim tesisi için bir yıllık enerji tüketim miktarları incelemesi yapılır.
- Enerji tüketim analizi yapıldıktan sonra senelik elektrik enerjisi üretim miktarı belirlenir.
- Kurulacak GES tipi belirlenir. Tüketicinin imkanlarına göre çatı GES veya araziye kurulacak GES olabilir. İki durum için de ön hazırlıklar belirlenir. Arazi GES için uygun bir arazi belirlenir ve proje sahası için enerji üretim potansiyel analizi yapılır. Çatı için ise yine potansiyel analizi ile birlikte çatının statik açıdan uygunluğu önemli bir değerlendirme konusudur.
- Teknik, finansal ve çevresel etki değerlendirmeleri gerçekleştirilir.
- Enerji Üretim Lisansı almak için EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) ile başvuru süreci başlar.

2. *Finansman ve Yatırım*

- Projenin finansmanı için uygun kaynaklar araştırılır.

- Yatırım maliyeti, finansal modeller ve projenin ekonomik değeri belirlenir.
- Yatırımcılar ve finans kurumlarıyla görüşmeler yapılır.

3. *İnşaat ve Mühendislik*

- Projeye başlamadan önce, sahanın fizibilitesi ve mühendislik tasarımı tamamlanır.
- GES sisteminin kurulumu ve altyapısı inşa edilir.
- İnşaat süreci boyunca proje yönetimi ve kalite kontrol süreçleri uygulanır.

4. *Elektrik Bağlantısı ve İzni*

- GES sistemi, elektrik şebekesine bağlanır.
- EPDK'dan alınan Enerji Üretim Lisansı ve yerel yönetimlerden alınan çeşitli izinlerle birlikte, elektrik bağlantısı için gerekli süreçler tamamlanır.

5. *İşletme ve Bakım*

- GES sistemi faaliyete geçtikten sonra, işletme ve bakım süreci başlar.
- Performans izleme, bakım planlaması ve günlük operasyonlar sürdürülür.
- Yenilenebilir enerji sertifikalarının yönetimi ve raporlaması yapılır.

6. *Enerji Satışı ve Dağıtımı*

- GES sistemi tarafından üretilen enerji, Enerji Piyasası Lisansı ile enerji satış şirketleri veya tedarikçilere satılabilir.
- Enerji, ulusal elektrik şebekesine entegre edilir ve dağıtılır.

GES kurulumu başlangıcında bağlantı anlaşmasına çağrı mektubu alınması çok önemli bir konudur. Bu aşamada öncelikle GES yapılacak bölgede ilgili elektrik dağıtım şirketine başvurular yapılmalıdır. Lisanssız üretim başvurusunda istenen belgeler şu şekildedir:

1. Lisanssız üretim bağlantı başvuru formu
2. Tüzel kişiyi temsil ve imzaya yetkişi şahıs veya şahıslar için yetki belgesi
3. Başvuruda bulunan tüzel kişinin ortaklık yapısını gösterir belgeler, doğrudan veya dolaylı pay sahiplerini gösteren diğer belgeler
4. GES kurulacak yere ait tapu (Eğer yer kiralık ise bu alan için hazırlanan ve ekinde imza sirkülerinin de olduğu en az iki yıllık olan kira sözleşmesi

gerekmektedir. Bu da yok ise alanın kullanım hakkının alındığına dair belge gerekecektir.)

5. Eğer yapılacak GES çatı uygulaması değil ise;

a. Mutlak tarım arazileri,

b. Özel tarım arazileri,

c. Dikili tarım arazileri,

d. Sulu tarım arazileri,

e. Çevre arazilerde tarımsal kullanım bütünlüğünün bozulmadığına dair ve bozan alanları kapsamadığına dair Tarım ve Orman Bakanlığı veya bu bakanlığa ait il müdürlüklerinden belge alınması gerekir.

6. Tüketim tesislerine ilişkin detayları içeren evraklar,

7. Çatı GES hariç olmak üzere eşik değerin üzerinde olan projeler için Çevresel Etki Değerlendirmesi Yönetmeliği kapsamında belge,

8. Başvuru ücreti ödeme makbuzu,

9. Harita mühendisi onaylı aplikasyon krokisi,

belgeleri toplanarak ilgili elektrik dağıtım şirketine başvuru yapılmalıdır. Yapılacak başvuruda kurulması planlanan GES'in kurulu gücü, yıllık enerji tüketimine göre ve tüketici imkanlarına göre belirlenerek yapılmalıdır. Başvurunun uygun görülmesi halinde ilgili elektrik dağıtım şirketi çağrı mektubu yazısı ile gerekli açıklamaları ve detayları başvuru sahibine ve yetkili kıldığı şahıslara verecektir.

GES süreci, Türkiye'nin enerji politikalarına, mevzuatına ve düzenlemelerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, projenin geliştirilmesi aşamasında, ilgili enerji kuruluşlarının güncel yönergelerini ve gereksinimlerini takip etmek önemlidir.

6. GÜNEŞ ENERJİ SANTRAL TASARIMI

Bu bölümde GES tasarımı Kütahya Dumlupınar ilçesindeki tüketim verileri ve bu veriler ile planlanan arazi GES örneği ile açıklanmaktadır.

Bir önceki bölümde lisanssız üretim için enerji tüketimi olması gerektiği ve mevcut yönetmeliklere göre kurulacak GES için tüketim miktarının en fazla iki katı kadar enerji üretimi yapılacaktır. Buna göre öncelikle yıllık enerji tüketim miktarı belirlenmelidir. Buna göre kurulacak santral gücünü belirlemek için denklem 1'deki yaklaşım kullanılabilir.

$$P_{DC} = \frac{E_t * 2}{t_g} \quad (1)$$

Burada, P_{DC}; kurulacak santralin kurulu gücünü (kW), E_t; tüketicinin yıllık elektrik enerjisi tüketim miktarını (kWh), t_a; santralin yapılacağı konum için yıllık güneşlenme süresini göstermektedir. Fakat burada verilen hesap hızlı ve basit bir yaklaşımdır. Bölgelere göre güneşlenme süresi, kullanılacak panel verimleri, panel türleri, eğim açısı, azimut açısı, inverterler ve diğer santral ekipmanları düşünülerek kurulu güç ve santralin elektrik şebekesine vereceği enerji miktarı belirlenmelidir. Bu nedenle daha doğru ve çok yönlü yaklaşımlar için uygulamada simülasyon araçları ve dijital programlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada Avrupa Komisyonu AB resmi sitesinde yer alan veri tabanı bilgileri kullanılmıştır (Huld, Müller, & Gambardella, 2012). Öncelikle belirlenen tüketim bilgileri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Kurumlara ait aylar bazında yaklaşık enerji tüketimi (kWh)

KURUM ADI	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam (kWh)
Allı Ören Köyü İçme Suyu	1162,235	893,595	778,65	675,5	801,728	981,437	796,524	1504,153	1508	1138,38	654,586	925,774	11820,562
Dumlupınar Kaymakamlığı	8177,85	9160	9378,4	8173,9	5326,1	4880,74	5013,02	5256,82	5243,88	5941,9	5816,8	7186,98	79556,39
Toplum Sağlığı Merkezi	2232,91	2103,225	1886,934	1756,51	1722,93	1667,14	1422,3	1407,56	1886,77	2101,25	2306,9	2148,78	22643,209
İlçe Tarım	539,122	598,75	578,157	553,878	546,799	573,426	487,012	492,911	513,722	571,174	601,114	583,057	6639,122
Hamur Köyü İçme Suyu/ Muhtarlık	1282,496	1066,98	1002,32	988,013	994,23	708,67	794,134	810,85	821,69	855,23	851,096	857,27	11032,979
Eydemir Köyü Muhtarlığı	1698	1432	1230	1056	995	750	523	498	759	1056	1291	1552	12840
Anadolu Lisesi Kız Pansiyonu	1526,37	2059,53	1781,55	1107,03	1352,91	526,32	1589,7	276,69	988,8	1665,87	1476	2057,22	16407,99
Anadolu Lisesi Okul Binası	1523,916	1918,068	2078,916	2108,25	1818,236	1118,44	151,25	201,326	1475,31	1818,916	1991,456	2022,916	18227
Dumlupınar MYO	535,672	554,405	404,895	254,656	108,837	60,581	60,665	72,708	81,815	480,77	542,601	515,716	3673,321
TOPLAM													182840,6

Tablo 2'de de görüleceği üzere tüm kurumlara ait yıllık enerji tüketimi bir yılda 182840,587 kWh olarak bulunmuştur. Bu durumda kurulacak GES için tüketim ve enerji satışı düşünüldüğünde yıllık yapılabilecek üretim miktarı en fazla 365681,174 kWh olabilecektir. Bunun üzerinde yapılacak üretimler YEKDEM'e bedelsiz olarak verilecektir. Bu nedenle tasarlanacak santralin kurulu gücü, yıllık olarak 365681,174 kWh üreteceği düşünülerek belirlenmelidir. Kurulu güç belirlenirken GES için öncelikle kullanılacak veya referans alınacak fotovoltaik panel belirlenmelidir. Bu çalışmada esas alınan fotovoltaik panel verileri tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Kullanılacak Panel Özellikleri

STC Maksimum Güç (Pmp)	550 W
Açık Devre Gerilimi (Voc)	49,9 V
Kısa Devre Akımı (Isc)	14 A

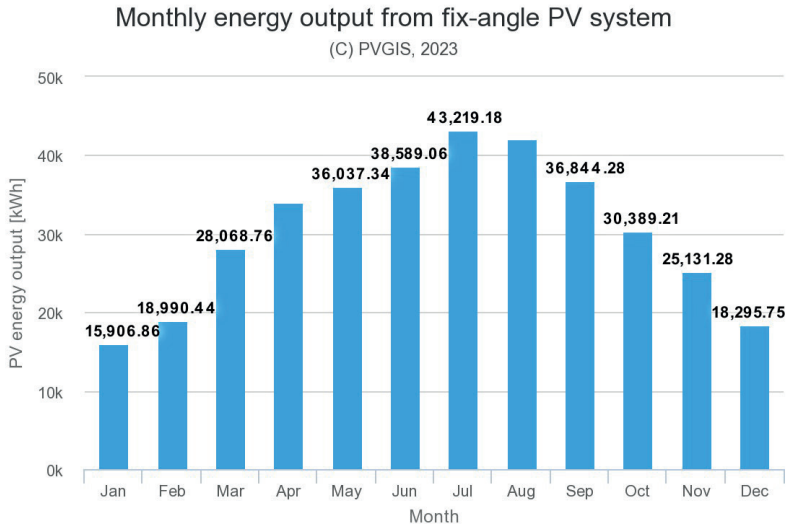
Maksimum Güç Gerilimi (Vmp)	41,96 V
Maksimum Güç Akımı(Imp)	13,11 A
STC Modül Verimi	21,3
Güç Toleransı (W)	(0,+4,99 W)
Maksimum Sistem Gerilimi	1500 V DC
Maksimum Seri Sigorta Değeri	25 A

Tablo 3'de verilen güneş paneli verileri standart test koşullarında (STC) ölçülen değerlerdir. STC koşulları ise Işınım 1000W/m2, hücre Sıcaklığı 25°C, Air Mass (AM)=1.5 şeklindedir. Buna göre kurulacak santralin kurulu gücü 250,25 kWp olarak belirlenmiştir. Bu santral için kullanılacak panel sayısı 455 adet olacaktır. Tablo 4'de kullanılan girdi verileri gösterilmiştir. Bu veriler kullanılarak PVGIS kullanılarak yıllık enerji üretim hesaplamaları yapılmıştır.

Tablo 4. GES enerji üretim hesabında kullanılan veriler

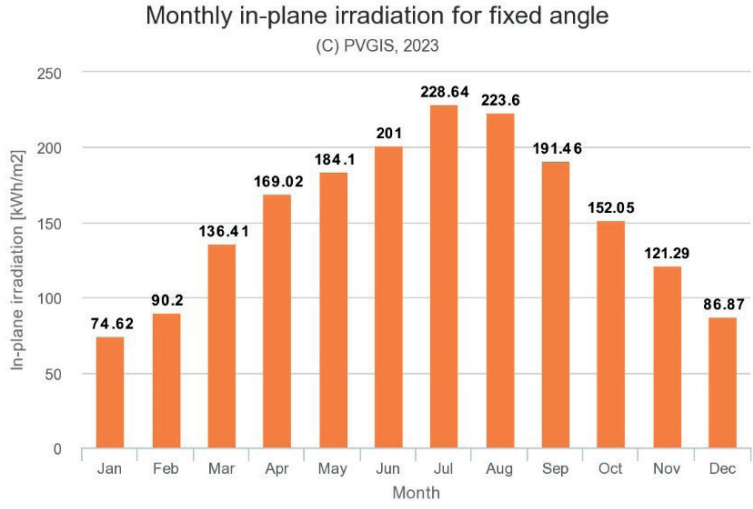
Girdiler	
Konum [Lat/Lon]:	38.857,29.972
Kullanılan veri tabanı	PVGIS-SARAH2
Güneş paneli teknolojisi	Crystalline silicon
GES kurulu güç [kWp]:	250
Sistem kaybı [%]:	14
Eğim açısı [Â°]:	31 (opt)
Azimuth angle [Â°]:	-6 (opt)
Yıllık düzlem içi ışınım [kWh/m2]:	1859.27
Yıldan yıla değişkenlik [kWh]:	11014.99
Geliş açısı [%]:	-2.72
Spektral etkiler [%]:	0.4
Sıcaklık ve düşük ışınım [%]:	-5.88
Toplam kayıp [%]:	-20.94

Tablo 4'deki veriler kullanılarak avrupa komisyonu tarafından hazırlanan veri tabanı kullanılarak yapılan yıllık elektrik enerji üretimi hesabı sonuçları şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. GES yıllık enerji üretimi

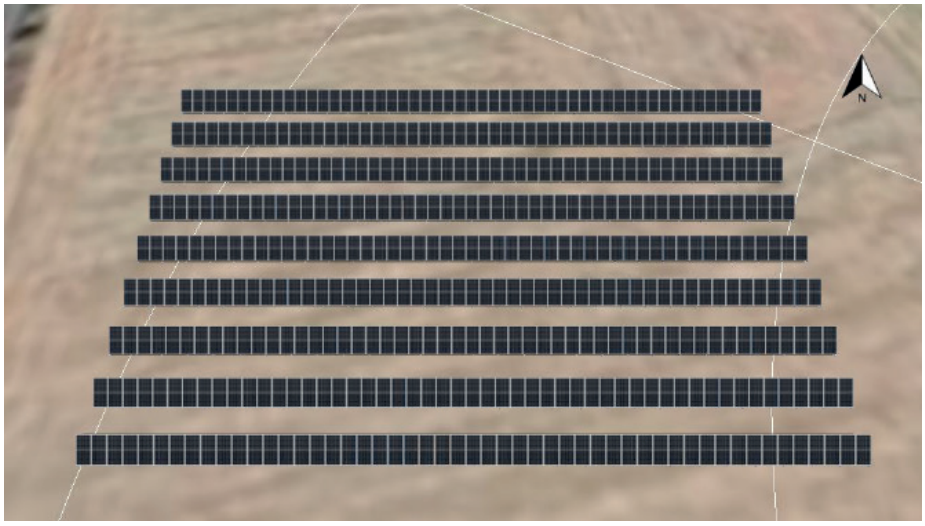
Şekil 3'de görüldüğü gibi verilen lokasyonda 250,25 kWp kurulu güce sahip bir santral kurulduğunda bir yılda 367475.71 kWh olarak bulunmuştur. Burada yıllık elektrik enerjisi üretiminde en önemli verilerden biri olarak sabit açılı güneş ışınımının aylık ölçümlerini gösteren veriler Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. GES lokasyonuna ait sabit açılı aylık güneş ışınımı (kWh/m²)

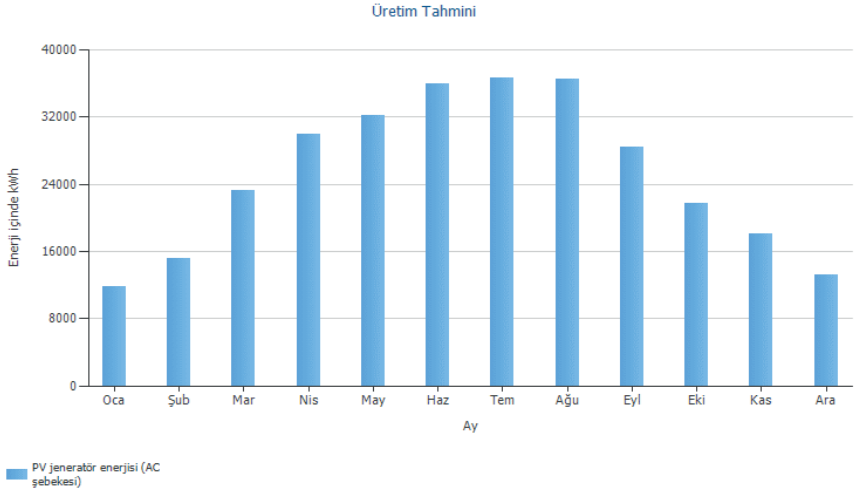
Ek olarak ikincil bir analiz PVsol programında yapılmıştır. Tablo 4'deki

aynı veriler kullanılarak yapılan çalışmadaki panel yerleşimi Şekil 5'de gösterilmiştir.



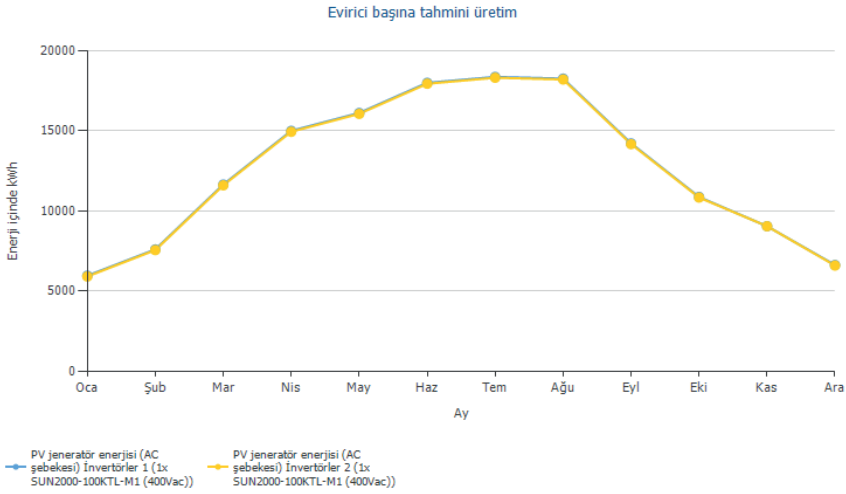
Şekil 5. Arazi panel yerleşim planı

Bu yerleşim için yaklaşık 1200 m² fotovoltaik panel yüzey alanı kullanılmıştır. Bu programda ise 250 kWp kurulu güce sahip santralin yıllık enerji üretimi ise 302.934 kWh olarak hesaplanmıştır. Buradan da görüldüğü gibi farklı analiz araçları ile yıllık enerji üretimi hesabı arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Santralin fizibilitesinde amortisman süresi hesabı yapılırken düşük olan yıllık enerji üretimi baz alınmıştır. Enerji üretiminin PVsol hesabı Şekil 6'da gösterilmiştir.



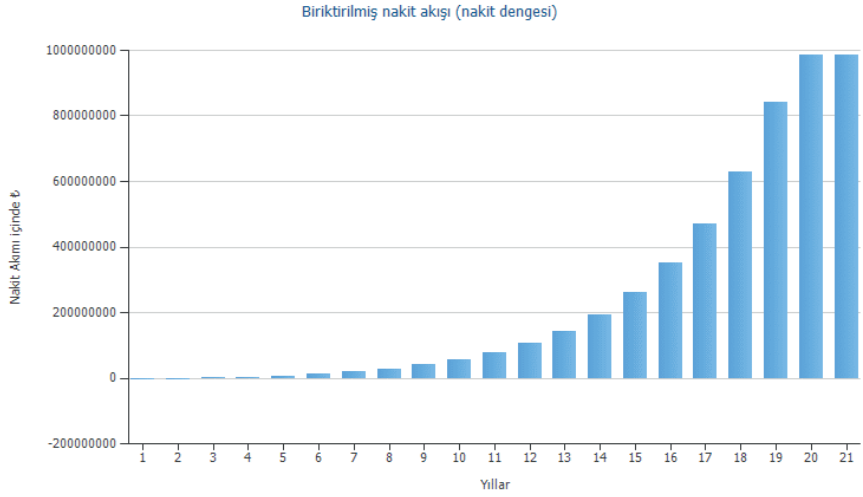
Şekil 6. İkincil analize göre yıllık enerji üretimi

Bu analizde inverter seçimleri de yapılarak GES için elektrik enerjisi üretim çıkışı da belirlenmiştir. İkincil analiz için iki adet 100 kW AC çıkışlı inverter seçilmiştir. Bu durumda santral şebeke bağlantı gücü 200 kWe olarak söylenebilir. Seçilen inverterler için her biri evirici başına tahmini aylık üretim değerleri de Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Evirici başına enerji üretim tahmini

Santralin kurulum maliyeti ve gelirler düşünülerek %30 enflasyon teşvik ve %1 anapara faizi dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Güneş enerji santrallerinin yatırım bedelini geri ödeme süreleri, yatırım maliyeti, yıllık enerji üretimi, aylık ve yıllık enerji satışı, işletme ve bakım giderleri ile enflasyon değişimleri baz alınarak hesaplanmıştır. Hesaplama yapılırken enerji satışı için birim fiyat 3,5 TL/kWh olarak hesaplanmıştır. Santral maliyeti ise enerji piyasası güncel sektör araştırmalarına göre 4.500.000 TL olarak alınmıştır. Hesaplama sonuçlarına göre program çıktısında amortisman süresi 2,8 yıl olarak bulunmuştur. Bu hesap neticesinde ve yukarıdaki finansal bilgilere göre program çıktısında biriktirilmiş nakit akışı bulunmuştur. Biriktirilmiş nakit akışı, belirli bir dönem içinde elde ettiği nakit girişleri ve çıkışlarının bir toplamını ifade etmektedir. Buna göre maliyetler ve kazançlara göre oluşturulan biriktirilmiş nakit akışı grafiği Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Biriktirilmiş nakit akışı

7. KİRLENMENİN VERİME ETKİSİ

GES'lerde enerji üretim verimlerine birçok faktör etki etmektedir. Kirlenme etkilerinden Bölüm 3'de bahsedilmiştir. Kirlenmeden kaynaklı verim kaybının önüne geçmek için belirli aralıklarla güneş panelleri temizlenmelidir. Literatüre bakıldığında 6 aydan fazla temizleme periyodu olduğunda santralin verimi %50 oranında azalabilmektedir. Bu nedenle vurgulanması gereken konu panellerin en az 6 ayda bir kez temizlenmesi gerektiğidir. Kirlilik modül üzerine düşen toplam ışınımı azaltmaktadır. Bu da panel verimini azaltmakta ve yıllık enerji üretimini büyük oranda düşürmektedir. Kirlenme olarak kısaca ifade edilen duruma etki eden birçok faktör vardır. Literatürde verime en fazla etki eden değişkenler; nem, yağmur, tozlanma, çevre sıcaklığı, hücre sıcaklığı, rüzgar hızı olarak gösterilmektedir. Kirlenmeden dolayı verim kayıpları konusunda yapılan çalışmalarda rüzgar ve yağmur kirlenmeyi azaltıcı yönde etki eden çevresel faktör olarak gösterilmektedir. Yazarlar bu alanda regresyon analizi ile tahmin modeli geliştiren bir yarı ampirik model geliştirmiş ve bu alanda çalışmalarına devam etmektedir.

8. SONUÇLAR

Enerji talebinin artışı, fosil yakıtların sınırlı kaynakları ve devam eden emisyon problemleri, dünyayı yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru yönlendirmiştir. Fosil yakıtların kısa bir gelecekte tükenme riski, enerji güvenliğini tehdit ederken, emisyonların çevresel etkileri de giderek artmaktadır. Bu zorluklar karşısında, güneş, rüzgar, hidro, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları yeşil enerji olarak öne çıkmaktadır. Bu kaynaklar, sürdürü-

lebilir bir enerji tedariki sağlamak adına çevre dostu ve düşük karbonlu bir seçenek sunmaktadır. Amortisman süreleri bakımından cazip olan yenilenebilir enerji teknolojileri, uzun vadede ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, teknolojik gelişmeler ve enerji politikalarındaki teşviklerle birlikte, dünya genelinde enerji dönüşümüne yönelik bir eğilim gözlemlenmektedir. Bu dönüşüm, sürdürülebilir enerji geleceğine doğru önemli bir adımı temsil etmektedir.

Alternatif enerji kaynakları, mevcut enerji sistemlerine bir alternatif olarak kabul edilen çeşitli enerji sistemlerine sahiptir. Yapılan araştırmada, bölgenin coğrafi konumu güneş enerji santrali kurulumu için uygun olduğunu göstermektedir. Oluşturulan tasarımda, 250,25 kWp'lik toplam kurulu güce sahip ve yılda 302.934 kWh enerji üreten bir sistem geliştirilmiş ve bu sistemin maliyet analizi gerçekleştirilmiştir.

Sistem için öngörülen ilk yatırım maliyeti 4.500.000,00 ₺ olarak hesaplanmış ve 2,8 yıl olan amortisman süresiyle birlikte değerlendirilmiştir. Bu amortisman değeri, yatırım açısından uygun bir alternatif enerji sistemi olma özelliği taşımaktadır. Sistem, kullanım ihtiyacını karşılamakla birlikte aynı zamanda şebekeyi besleyerek gelir elde etme potansiyeli taşımaktadır. Yapılan tasarıma göre, yıllık üretilen enerjinin %60,36'sı tüketim için kullanılırken, %39,64'ü şebekeyi besleyerek şebeke geliri sağlayacaktır. Birikmiş nakit akışı, Şekil 8'de gösterildiği gibi şekillenmektedir.

Fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan olumsuz bir etken de emisyon durumudur. Bu yakıtlar, yapıları gereği atmosfere sera gazları salmaktadır, bu da çeşitli çevresel sorunlara yol açabilir. Hava kirliliği, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi sorunlar, fosil yakıtların kullanımının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, mümkün olduğunca sera etkisi oluşturmayan enerji kaynaklarına yönelmek, çevre açısından önemli bir adımdır. Tasarlanan sistem, çevresel etkilerini değerlendirdiğinde, yılda 142,358 kg CO2 emisyonunu engelleyerek enerjinin çevresel etki üzerinde olumlu bir etki sağlamaktadır.

Bu çalışmanın bir özelliği, Tablo 2'de görülen kamu kurumları tüketim verilerinden daha fazla enerji üretimine odaklanmasıdır. Ancak, ilgili yönetmelik, ihtiyaç fazlası enerjinin tamamının satılamayacağını belirtmektedir. Yönetmelik, tüketim değerleri doğrultusunda üretime izin verirken, benzer büyüklükteki ve daha yoğun nüfusa sahip bölgelerde tüketim oranlarının daha yüksek olabileceğini öngörmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmadakine benzer güçlerde Güneş Enerjisi Santrali (GES) kurulumunun mümkün olabileceği düşünülebilir. Ayrıca, kamu kurumlarının toplumsal desteğini artırmak ve sera gazı emisyonunu azaltıcı projelerde öncü olma özelliğini vurgulamak amacıyla enerji tüketim sınırlaması olmadan enerji üretimine izin verilmesi önerilebilir.

Bu araştırma, dünya genelinde karşılaşılan zorluklar arasında fosil yakıtların sınırlı oluşu, iklim değişikliği ve artan enerji talebinin yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarının kritik önemini vurgulamaktadır. Yenilenebilir enerji sadece enerji üretiminde değil, aynı zamanda enerji verimliliği ve karbon ayak izini azaltma çabalarında da önemli bir rol oynamaktadır.

Güneş enerjisi santralleri, kamu kurumları ve özel sektör tarafından giderek daha yaygın bir şekilde benimsenmektedir. Özellikle yüksek elektrik ihtiyacına sahip olan kurumlar için güneş enerjisi santralleri, enerji maliyetlerini düşürmenin yanı sıra çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmektedir. Bu araştırma, Dumlupınar ilçesindeki kamu kurumlarına güneş enerjisi santrallerinin entegre edilmesinin potansiyelini incelemiştir.

Ayrıca, güneş enerjisi santrallerinin enerji verimliliğine olan olumlu etkilerine vurgu yapılmaktadır. Bu sistemler, güneş ışığından elektrik üretebilme kapasitesine sahip olduklarından, enerji verimliliğini artırarak enerji tüketimini optimize etmeye önemli bir katkı sunmaktadır. Aynı zamanda, bu santrallerin karbon ayak izini azaltma konusunda büyük bir potansiyeli bulunmaktadır. Yıllık enerji üretimi arttıkça, fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi ve sera gazı emisyonlarındaki azalış belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Bu araştırmanın sonuçları, güneş enerjisi santrallerinin kamusal kurumların enerji altyapısındaki kritik rolünü vurgulamaktadır. Bunun yanı sıra, sürdürülebilir enerji geleceğini inşa etmek ve enerji bağımsızlığını desteklemek amacıyla bu teknolojilerin yaygınlaştırılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Kamu sektöründe güneş enerjisi teknolojilerini benimsemeyi düşünenler için, bu çalışma bilgilendirici bir kaynak olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, enerji talebinin sürekli bir artış göstermesi ve fosil yakıtların azalması, dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynakları sistemlerine doğru bir yönelişi beraberinde getirmiştir. Güneş enerjisi, rüzgâr, hidro ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları, enerji ihtiyacını karşılamak adına son derece uygun bir alternatif sunmaktadır. Bu bağlamda, gelecekte daha pek çok kamu kurumu ve özel sektör kuruluşunun, enerji bağımsızlığını artırmak ve sürdürülebilir enerji üretimini teşvik etmek amacıyla güneş enerjisi santrallerini benimsemesi beklenmektedir.

Bu çalışma, sadece örnek bir model sunmakla kalmayıp farklı coğrafi bölgelerde ve çeşitli kurumlar için benzer analizlerin yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji projelerinin genişletilmesi, enerji sektöründe önemli bir dönüşümün bir parçası olarak görülmelidir. Bu dönüşüm, temiz ve sürdürülebilir bir enerji geleceğini desteklemek açısından gelecek nesiller için hayati bir öneme sahiptir.

KAYNAKÇA

Acır, A., Çinici, O., & Bayyiğit, A. (2023). *Tek Yüzeyli ve Çift Yüzeyli Fotovoltaik Panellerin Performans Analizi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji. doi:10.29109/gujsc.1298017

Adalı, S., Dönmez, T., & Yalılı Kılıç, M. (2021). *Bursa Ve Karaman İllerinde Konutlarda Güneş Enerji Potansiyelinin Uygulanabilirliğinin Araştırılması*. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi. doi:10.17482/uumfd.952925

Akan, A., & Akan, A. (2021). *Meeting of Energy Demand for Irrigation of Off-Grid Agricultural Land by Solar-Wind Energy System with Battery Storage*. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. doi:10.31590/ejosat.1011474

Biçen, T., & Vardar, A. (2022). *Güneş Panelleri İle Elektrik Üretiminin Teknik Ve Ekonomik Analizi: Bursa Örneği*. Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi.

Dal, A. R. (2021). *Güneş Enerji Panellerindeki Optimum Eğim Açısının Verime Etkisinin İncelenmesi*. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. doi:10.35193/bseufbd.878795

Duran, F., & Kabul, A. (2014). *Isparta İlinde Fotovoltaik/Termal (Pv/T) Hibrit Sistemin Performans Analizi*. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi.

EPDK. (2023). Elektrik Piyasası Sektör Raporu 2023.

Geliş, K., Akyürek, E., & Yoladı, M. (2020). *Effect Of Panel Position And Angle On Photovoltaic Panel Characteristics*. Journal of the Institute of Science and Technology. doi:10.21597/jist.686478

Gündoğdu, K., Kabadayı, H., & Öztürk, A. (2016). *Fotovoltaik Paneller İçin Güneş Takip Edebilen Basit Ve Ekonomik Bir Sistem Tasarımı*. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi.

Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). *A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa, 86*, 1803-1815. Solar Energy.

Jamaly, M., Juan, L., & Kleissl, J. (2013). *Aggregate Ramp Rates of Distributed Photovoltaic Systems in San Diego County*. IEEE Transaction on Sustainable Energy.

K. Olcay ve N. Çetinkaya, "Elektrikli Araçların Şarj Edilmesi İçin Güneş Enerjisi Santrali Önerisi ve Sistemin Elektrik Ağı ve CO2 Emisyonuna Etkileri", 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) , Kharkiv, Ukrayna, 2021 , s. 249-254, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570056.

Kaplan, C., & Kükner, A. (2017). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Ve Alternatif Sevk Sistemlerinin Yatlarda Uygulanması*. Gemi ve Deniz Teknolojisi.

Mete, M., & Güven, A. (2021). *Balıkesir İli Erdek İlçesi İçin Bağımsız Hibrit Enerji Sisteminin Fizibilite Çalışması Ve Ekonomik Analizi*. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi. doi:10.36306/konjes.978002

Olcay, K.; Çetinkaya, N. Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Elektrik Şebekesine Etkilerinin Yapay Sinir Ağı ile Analizi. Enerjiler 2023, 16, 1282. https://doi.org/10.3390/en16031282

Oral, G., & Uçar, O. (2014). *Güneş Takip Sistemleri Ve Prototip Gerçekleştirme*. İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi.

Park, H., Park, H., Öztürk, A., & Khan, M. (2019). *Utılızatıon Of Robotıcs For Solar Panel Cleanıng And Maıntenance*. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi. doi:10.36306/konjes.654942

Poyraz, E., & Güven, A. (2021). *Feasibility Study and Techno-Economic Analysis of Stand-Alone Hybrid Energy System for Muğla Province Köyceğiz*. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi. doi:10.31466/kfbd.880437

Rao, A., Pillai, R., Mani, M., & Ramamurthy, P. (2014). *Influence of Dust Deposition on Photovoltaic Panel Performance*. Energy Procedia.

Tabak, A. (2021). *Konya İlinde Bir Fabrikanın Enerji Talebinin Karşılanması için Hibrit Enerji Üretim Sisteminin Analiz ve Tasarımı*. International Journal of Engineering Research and Deveplopment. doi:10.29137/umagd.794898

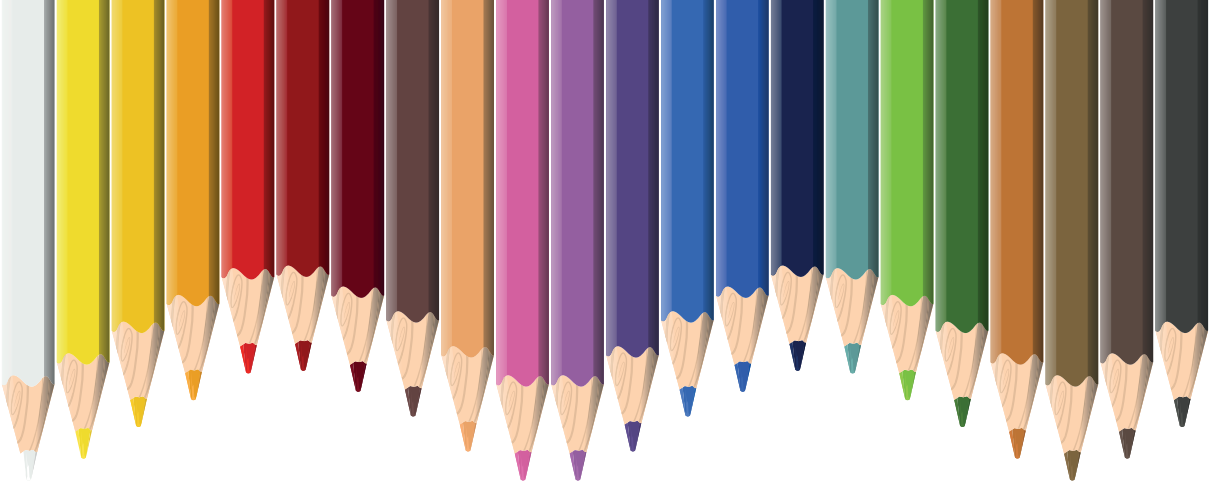
Tanış, Z., & Altıntaş, N. (2023). *Elazığ İlinde Şebekeye Bağlı 1036,8 kwp Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralinin Ölçülen ve Simüle Edilen Performans Verilerinin Analizi*. EMO Bilimsel Dergi.

Taşçıoğlu, A., & Keser, H. (2019). *Solar Energy in the Logistics Sector: Assessments on Turkey*. Journal of Business and Social Review in Emerging Economies. doi:10.26710/jbsee.v5i2.822

Turmuş, A. (2018). *Düzlemsel yansıtma destekli düzlemsel güneş paneli tasarımı*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Tüzün Özmen, T., & Özdemir, T. (2023). *Farklı Tipteki Fotovoltaik Güneş Panellerinin Düzce için 2014-2019 Yılları Arası Yaz Ayları Performans ve Verimlilik Analizi*. Düzce Ünversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi. doi:10.29130/dubited.1060952

Yemenici, O. (2020). *Aerodynamic mechanisms on a ground-mounted solar panel at different wind directions, Vol.25*, 111-120. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering. doi:10.17482/uumfd.690533



Bölüm 12

ÇOK CİSİMLİ MODELLEME YÖNTEMİ İLE BİR SEDAN ARACIN TAM TAŞIT MODELİNİN KURULMASI VE AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİ İLE KONTROLÜNÜN İNCELENMESİ*

Lütfü TUTAR[1]
Elif ERZAN TOPÇU[2]

1 Yüksek Mühendis Lütfü TUTAR, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bilim Dalı, Bursa, TÜRKİYE, melutfu@gmail.com; ORCID No: 0000-0001-7874-6425
2 Doç. Dr. Elif ERZAN TOPÇU Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa TÜRKİYE, erzan@uludag.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6115-3110
*Bu çalışma Doç. Dr. Elif ERZAN TOPÇU danışmanlığında Lütfü TUTAR tarafından 2023 yılında tamamlanan "ELEKTRO-HİDROLİK EYLEYİCİLİ AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNE SAHİP BİR TAŞITIN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ" başlıklı ve 797457 tez no'lu yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

1. GİRİŞ

Otomobilin icadından itibaren otomotiv sektöründe her geçen gün gelişmeler olmaktadır. Günümüzde mevcut içten yanmalı motora sahip araçların tasarımı ve geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar sürse de elektrikli ve otonom taşıt teknolojileri ile ilgili yapılan çalışmalar da hız kazanmıştır. Otomotiv sektörünün gelişiminde seyir güvenliğinin, yolcu konforunun ve uygun maliyetlerde sürdürülebilir ürün tasarımının ana hedefler olduğu söylenebilir. Taşıt tasarımında yoldan gelen uyarılar yani titreşim etkisi, özellikle yolcu konforu ve seyir güvenliğini önemli oranda etkilemektedir.

Titreşim bir sistemin denge konumu etrafında yapmış olduğu belirli aralıklarla tekrarlanan hareket olarak tanımlanabilir (Ercan, 2009). Mekanik bir sistemde titreşim, hareket veya konumuna ait niceliğin zamana bağlı değişimi olarak ifade edilir (Mehta ve Kailey, 2016). Taşıt üzerindeki titreşimler, taşıt gövdesinden sürücü ve yolculara aktarılır. Titreşimin insan sağlığı üzerinde de önemli etkileri bulunmaktadır. Titreşimler genellikle düzensiz olduklarında ve kontrol edilemediklerinde yıkıcı etkilere sahip olabilirler. Titreşimlerin en önemli yıkıcı etkilerinde birisi rezonanstır. Özellikle sönüm oranı küçük olan sistemlerde rezonans frekansında oluşan titreşimlerin genlikleri büyüktür ve sistemlerin bu rezonans frekansında zorlanmamaları ve doğal frekanslarından uzak değerlerde çalıştırılması gerekir.

Taşıtlarda titreşim oluşturan temel sebepler, çevre kaynaklı (yol pürüzlülüğü vb.) ve taşıt kaynaklı (motor, fanlar vb.) titreşimler olarak iki grupta sınıflandırılabilir. Bu titreşimlerin iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Yoldan gelen titreşimlerin sönümlenebilmesi için araçlarda süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Süspansiyon sistemi, araçların gövde ile tekerlekleri arasına yerleştirilerek aracın ağırlığını taşıyan, sürüş konforu ve güvenliğini sağlayan, yol yüzeyinden kaynaklanan sarsıntı, salınım ve ani şokları sönümleyen, seyir halinde ve dönüşlerde aracın maksimum seviyede yola tutunmasını sağlayan sistemdir (Goodarzi ve Khajepour, 2017). Süspansiyon sistemleri temelde yaylanan kütle, yaylanmayan kütle ve bu iki kütle arasında yer alan yay ve sönüm elemanlarından oluşan bir yapıya sahiptir. Bu sistemler yoldan gelen uyarıların oluşturduğu titreşimleri yay ve sönüm elemanları ile enerjilerini depolayarak ve sönümleyerek, araç gövdesine ve yolculara iletimini azaltmaktadır. Gövde ve şasi üzerine gelen tepkileri azaltmak, sürüş emniyetini arttırmak ve sürücüye gelen rahatsızlıkları en aza indirerek sürüş konforunu iyileştirmek için farklı süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Seyir güvenliği aracın yola tutunması ile alakalıdır. Aracın hızlanma, frenleme ve virajlardaki durumu için aracın dengesinin korunması istenir. Sürücü ve yolcuların konforu, araç dinamiği dengesi ve emniyet faktörü göz önüne alındığında bu konular birlikte düşünülmeli ve uygun tasarım yapılmalıdır (Els, Theron, Uys ve Thoresson, 2007).

Konforun iyileştirilmesi, seyir güvenliğinin arttırılması, araç dinamiği gibi konular otomotiv sektörünün çözümlenmesi istendiği önemli konulardan olduğu için çeşitli modelleme yöntemleriyle aracın farklı koşullarda verdiği titreşim tepkileri incelenir ve bu tepkilere göre sorunu azaltmak için uygun parametre veya cevap oluşturulur. Bu yöntemler süspansiyon sistemlerinin tasarımı ve kullanım ömrü için oldukça kritiktir. Günümüzün teknolojik araçlarında süspansiyon sistemleri de tek başına yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle üst segment araçlarda pasif süspansiyonların yerine yarı-aktif ve aktif süspansiyonların kullanımı artmaya başlamıştır. Tercih edilen bu süspansiyon sistemleri farklı kontrolcü ve eyleyici ile maksimum konforun sağlanması istenir.

Literatürde, araç süspansiyon sistemi tasarımı ve kontrolü ile ilgili pek çok çalışma olduğu görülmektedir. İncelenen çalışmalarda belirlenen süspansiyon ve araç yapısına uygun modelleme yapılarak denetleyici tasarımı ve eyleyici seçimi yapıldığı gözlemlenmiştir. Yapılacak modelleme, araç tipi, süspansiyon tipi ve araç hareket kabiliyeti gibi durumlar göz önüne alınarak yapılır. Yapılan araştırmalarda aracın serbestlik derecesine göre elde edilen hareket denklemleri ile doğrusal model üzerinden kontrolcü tasarımı ve modelleme çalışmalarının yaygın olduğu görülmüştür. Çeyrek, yarım ve tam taşıt modellerinden elde edilen hareket denklemleri ile araç gövdesinin titreşimlerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son senelerde yapılan çalışmalara bakılacak olursa; Tian ve Nguyen (2020) aktif süspansiyon sistemi için PID kontrolcüsünün araç sürüş konforu üzerindeki performansını, arabaların farklı çalışma koşullarına göre incelemişlerdir. Yang vd. (2022) yol profilini Lidar sensörü ile algılayıp, yedi serbestlik dereceli araç süspansiyon modelinde yarı aktif süspansiyon sistemi kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Denetleyici olarak çapraz yinelemeli sinir ağı kullanmışlar ve sinir ağı ağırlığını genetik algoritma ile optimize etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre aracın sürüş konforunda ve dengesinde yol profili öngörüsü ile iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Homayoun vd. (2020) yaptıkları hidrolik eyleyicili aktif süspansiyon çalışmasında, uyarlanabilir sinir ağı geri adımlama kontrol yöntemini kullanmışlardır. Sonuçlara göre yararlı ve uygulanabilir bir yöntem olduğunu gözlemlemişlerdir. Altun (2017) çeyrek taşıt aktif süspansiyon sistemi için LQR ve LQI denetleyicilerinin karşılaştırılmasını incelemiştir. Kılıçaslan (2018) yaptığı çalışmada hidrolik eyleyicili çeyrek taşıt aktif süspansiyon sisteminde duruma bağlı Ricatti denklemi ve Riccati denklemi dizisi şeklinde iki kontrol yöntemi kullanmıştır. Sonuçlara göre iki kontrol yönteminin de benzer şekilde iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir.

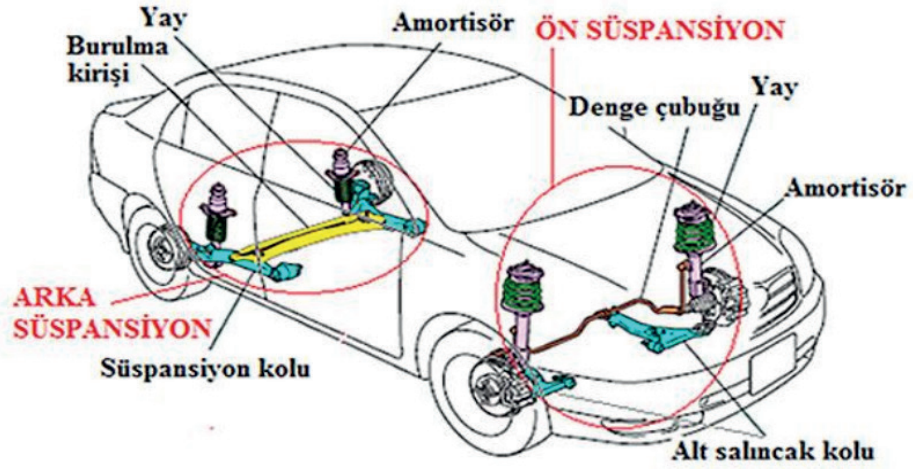
Bu çalışmada da çok cisimli modelleme yöntemi ile bir sedan aracın tam taşıt modelinin kurulması detaylı olarak sunulmuştur. İlk aşamada çalışmada incelenen aracın katı modeli Solidworks programında elde edilmiştir. Bu katı model MATLAB programında Simulink/Multibody ortamında aracın

pasif sistem modeli kurulmuştur. İkinci aşamada bu model ile sistemin isterlerine göre boyutlandırılan elektro-hidrolik valf-silindir eyleyici sistemi birleştirilmiştir. Sistemin süspansiyon strokuna göre geri-beslemeli denetimi yapılması hedeflenmiş ve denetim organı olarak PID ve bulanık mantık denetleyicileri tasarlanmıştır. Pasif ve aktif süspansiyon sistemine sahip taşıt sisteminin zaman alanı cevabı tümsek yol girdisine göre karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2. SÜSPANSİYON SİSTEMİ TEMEL ELEMANLARI VE ÇEŞİTLERİ

Süspansiyon sistemleri araçlarda gövde tekerlek arasına yerleştirilen, gövdeyi taşıyan, yoldan gelen bozuklukları rijitliğinden dolayı neredeyse olduğu gibi ileten tekerleğin hareketlerini sönümleyerek gövdeye gelen titreşimleri engelleyen hareketli yapıdır. Süspansiyon sistemleri, yaylar, amortisör, denge çubuğu, aks elemanları, salıncak kolları ve rotiller gibi küresel mafsallardan oluşmaktadır.

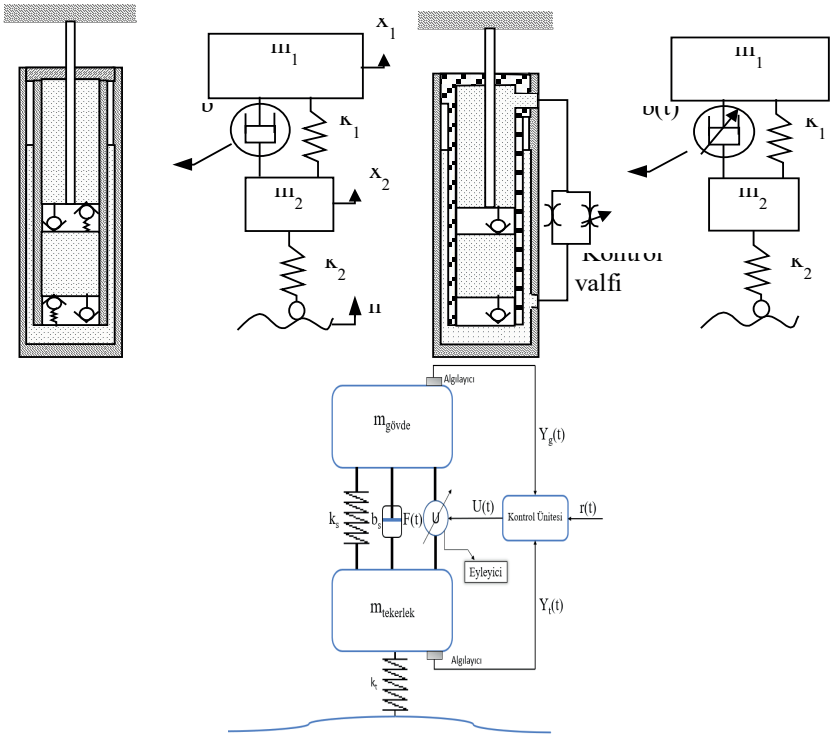
Süspansiyon sisteminde kullanılan yaylar, aracın yükünü taşır, yoldaki çukur, tümsek gibi düzgünsüzlüklerde sıkışır ve uzar. Yayların esnekliği seyir güvenliği için oldukça önemlidir. Çünkü aracın düz yüzeyde giderken yere daha fazla temas etmesi için sert bir yapıda olması istenir. Diğer yandan bozuk bir yolda giderken ise yayların esnek bir yapıda olması istenir. Taşıtlarda yüke, taşıtın tipine ve süspansiyon yapısına göre sıkışma, eğilme, burulma ve hava yayları gibi farklı tiplerde kullanılır. Süspansiyon sistemlerinde yaylar arzu edilen güvenlik ve konfor şartlarını sağlamak için genellikle sönüm elemanları ile birlikte kullanılmaktadırlar. Amortisörler süspansiyon sistemindeki sönüm elemanlarıdır. Süspansiyon sistemlerinde taşıtın hareketi sırasında ortaya çıkan titreşimlerini sönümlemek için kullanılan yapılardır. Denge çubuğu virajlarda aracın sağa ve sola yatmasını önleyen, z-rot veya salıncak kolu ile süspansiyon sistemine bağlanır. Önemli bir güvenlik elemanıdır. Salıncak kolları, tekerleği şaseye mafsallar ile bağlayan hareketli bir yapıdır. Tekerleğin dönüşlerde, çukurlarda ve tümseklerde oluşturduğu, yanal ve uzunlamasına olan yükleri taşır. Aynı zamanda süspansiyon geometrisi için akslara kılavuzluk eder. Rotiller küresel mafsallardır. Aks salıncak kolları gibi süspansiyon elemanları için bağlantı elemanıdır. Şekil 1' de ön ve arka süspansiyonun temel bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 1. *Taşıt ön ve arka süspansiyon sistemi bileşenleri (MEB, 2013)*

Süspansiyon sistemlerinin yapıları kullanıldıkları taşıta ve amaca göre farklılık gösterir. Yapılarına göre sabit süspansiyon, serbest süspansiyon sınıflandırılabilirler (Çetinkaya, 2017). Süspansiyon sistemleri titreşim sönümleme özelliklerine göre pasif, yarı aktif ve aktif süspansiyon sistemleri olmak üzere üç temel grupta incelenebilir (Erzan Topçu, Yüksel ve Kamış, 2002). Şekil 2' de bu süspansiyon sistemlerinin şematik görünümleri sırasıyla sunulmuştur. Pasif süspansiyon sistemi enerjiyi yay ve sönüm elemanları ile absorbe eder. Bu sistemlerde tasarımından itibaren belirlenen yay ve sönüm elemanları sabit katsayılıdır. Yay ve sönümleme kuvvetleri yalnızca yerel harekete göre oluşur. Bu nedenle süspansiyon sisteminin karakteristiği araca etkiyen uyarılara göre değişmez. Yapısı basit, sade ve diğer iki süspansiyon sınıfına göre daha az maliyetlidir. Günümüzde pek çok araçta kullanılmaktadır. Yarı aktif süspansiyon sisteminin en önemli üstünlüğü sönüm elemanlarının karakteristik katsayılarının elektronik kontrol ünitesinden gelen sinyaller ile sürüş moduna göre değiştirilmesidir. Burada sabit katsayılı sönüm elemanının yerine değişken katsayılı bir damper yapısı kullanılır (Şengirgin vd., 2000). Bu değişken orifisli veya MR (Manyeto-Reolojik) akışkanlı bir amortisör olabilir. Pasif süspansiyona göre aracın değişken yol durumlarında daha iyi hareket etmesini sağlanabilir. Örneğin yüksek hızlarda sönüm elemanı rijit bir yapı gibi davranarak arabanın yola tutunmasını sağlayabilir, diğer yandan konfor istendiğinde ise sönüm elemanı yumuşak bir tepki verebilir. Aktif süspansiyon sistemleri yay ve sönüm elemanlarına ilave bir eyleyici ile uygun tepkinin oluşturulmasını ve uygulanmasını sağlayan konforlu bir süspansiyon sistemidir. Uyarılara göre süspansiyon kuvveti üreten bu yapıda güç kaynağı, denetim birimleri ve algılayıcılar içeren elektronik denetimli elemanlar

kullanılması sistemin maliyetini arttırır. Bu sistemlerin güç kaynaklarına göre pnömatik, hidrolik, manyetik, elektromekanik gibi çeşitleri vardır.



a) Pasif Süspansiyon sistemi *b) Yarı aktif süspansiyon sistemi* *c) Aktif süspansiyon sistemi*

Şekil 2. *Süspansiyon sistemi çeşitleri (Erzan Topçu vd., 2002; Tutar, 2023)*

3. ARAÇ VE SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Araç ve ekipmanlarının dinamik davranışlarının incelenmesi ve iyileştirilmesi için çeşitli teorik ve deneysel çalışmalar yapılması gerekmektedir. Sistem üzerinde yapılacak her bir değişimin deneysel olarak incelenmesi hem yüksek maliyetli hem de zaman alıcıdır. Ortaya konan yeterli doğruluktaki bir model ile sistemin dinamik davranışı incelenebilmektedir. Bu sebeple Ar-Ge çalışmalarında öncelikli olarak taşıt sistemlerinin modellenmesi ve ardından model cevabının doğrulanması gibi çalışmalar tercih edilmektedir. Buna göre süspansiyon sistemleri, eyleyici, kontrolcü vb. yapıların tasarımı ve modellemesi de Ar-Ge çalışmalarında yaygın olarak çalışılan konulardandır. Elde edilen cevaplara göre iyileştirme ve parametre ayarı işlemleri daha az maliyetle ve zamandan tasarruf edilerek gerçekleştirilebilmektedir.

Araç sistemlerinin modellemesi içinSistemin matematiksel modelinin elde edilmesi için klasik yöntemlerde öncelikle sistemin serbest cisim diyagramı oluşturulur. Newton hareket yasaları, Euler enerji yöntemleri, Lagrange

vb. yöntemler kullanılarak aracın dinamik davranışını temsil eden hareket denklemleri elde edilebilir. Çıkarılan bu diferansiyel denklemler çözüm yöntemlerine uygun bir şekilde çözümlenir ve sonuçlar elde edilir. Elde edilen sonuçlar doğrulanır, yeterli doğruluktaysa çözüm kabul edilir, değilse yöntem tekrar gözden geçirilerek model iyileştirilir (Yüksel, 2018).

Süspansiyon sistemlerinin gelişiminde tarihsel olarak bakıldığında aracın en basit yapıda çeyrek taşıt modellemesi yapılarak matematiksel modeli elde edilerek sistemin dinamik davranışı incelenebiliyordu. Bu yapıyı kullanarak eyleyici, kontrolcü geliştirilmesi ile ilgili çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Ancak farklı süspansiyon tiplerinin ortaya çıkması araçların sadece düşeyde değil de diğer eksenlerdeki hareketlerinin de incelenmesi talebinin olması gibi sebeplerle araç ve parçalarının daha anlaşılır bir şekilde modellenmesi gerekliliği doğmuştur.

Modelleme araçlarındaki gelişmeler taşıt, süspansiyon sistemi vb. yapıların daha detaylı olarak incelenme kabiliyetini de arttırmıştır. Günümüzde araç sistemlerinin modellenmesi için pek çok farklı yöntem ve araçlar geliştirilmeye devam etmektedir. Alt bileşenleri ile MATLAB, Simcenter Amesim, ALTAIR, Msc ADAMS, RecurDyn vb. pek çok program farklı tür ve karmaşıklıktaki problemleri çözmek için kullanılmaktadır. Çok cisimli (multibody) mekanik sistemlerin dinamik davranışının incelenmesi de hem görsel olarak hem de detay analizlerin elde edilmesinde kullanılan yöntemlerden birisidir. Bir sonraki bölümde bu konuyla ilgili detaylı bilgilendirme yapılarak örnek bir çalışma sunulmuştur.

4. ÇOK CİSİMLİ MEKANİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Bu çalışmada incelenen "MATLAB- Simscape Multibody" robotlar, araç süspansiyonları, inşaat ekipmanı ve uçak iniş takımları gibi 3 boyutlu mekanik sistemler için çok cisimli bir simülasyon ortamı sağlar. Çok cisimli sistemleri gövdeleri, eklemleri, kısıtlamaları, kuvvet elemanlarını ve sensörleri temsil eden blokları kullanarak modelleyebilirsiniz. "Simscape Multibody" mekanik sistem için hareket denklemlerini formüle ederek çözüm gerçekleştirilir. Tüm kütleler, ataletler, eklemler, kısıtlamalar ve 3B geometri de dahil olmak üzere bilgisayar destekli CAD montajları modele aktarılabilir. Ayrıca oluşturulan üç boyutlu animasyonla sistem dinamiklerini grafiksel incelemenin yanında görselleştirmeye de imkan sağlar (MathWorks-Simscape Multibody,2023).

SolidWorks gibi CAD programlarında elde edilen katı modellerin benzetim programlarıyla beraber kullanılması aşamasına da geçilmiştir. Bu şekilde elde edilen modeller yapıları daha gerçekçi bir şekilde inceleme fırsatı oluşturmuştur. SolidWorks, 2D teknik çizim ve 3D katı modelleme yapabilmek için kullanılan bir bilgisayar destekli grafik tasarım (CAD) ve bilgisa-

yar destekli mühendislik (CAE) yazılımıdır (Yenasoft, 2023). Katı modelleme programlarında oluşturulmak istenen modelin parçaları tek tek uygun boyutlarda elde edilir. Elde edilen parçalar, modelin hareket dinamiğine göre montaj arayüzünde birleştirilir. Birleştirilen montaj parça, model ile birebir aynı dinamiklere sahip olur.

Oluşturulan katı modeller MATLAB programına aktarılarak, Simscape/Multibody uygulamasıyla yazılımsal ve görsel analiz elde edilebilir. MATLAB/Simulink/Simscape/Multibody uygulama arayüzünde başka programlardan katı model aktarılabildiği gibi kendi içerisinde de model oluşturulabilir. Bu çok cisimli uygulama herhangi bir sistemin modellenmesini ya da CAD programlarında elde edilen modelin incelenmesini sağlayan uygulamadır. Bu modeller MATLAB programının diğer kütüphaneleri ile de beraber çalışabilme kabiliyetine de sahiptir. Bu çalışmada hidrolik güç iletim sisteminin modellenmesine yönelik elemanları sunan "MATLAB/Simulink/Simscape/Fluids" kütüphanesi ve çalışma kapsamında kontrolcülerin kullanılmasını, tasarlanmasını ve optimizasyonunu sağlayan "MATLAB/Control Toolbox" PID (orantı+integral+türev) ve "Fuzzy Logic" kütüphane elemanları kullanılmıştır.

5. ELEKTRO-HİDROLİK AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNE SAHİP TAM TAŞIT MODELİNİN ELDE EDİLMESİ

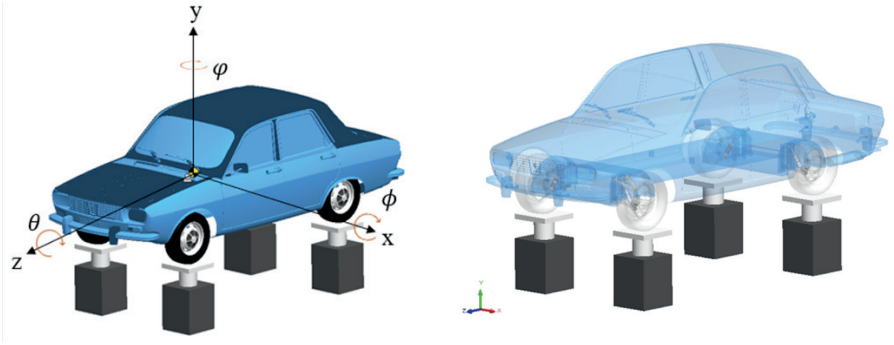
Bu bölümde bir sedan aracın çok cisimli modelleme tekniği ile modellenmesi, pasif ve aktif süspansiyon sisteminin oluşturulması ve aktif süspansiyon sistemi için kontrol sistemi tasarımı konuları hakkında bilgi sunulmuştur.

Bu çalışmada tam taşıt modellemesi için seçilen sedan bir aracın gövdesinin, süspansiyon sisteminin ve tekerleklerinin SolidWorks programında ayrı ayrı katı modeli kurulmuştur. Kurulan modeller montajlanmıştır. Süspansiyon sistemi için serbest yapılı çift salıncaklı süspansiyon tipi seçilmiştir. Aracın gövdesi, tekerlekleri ve süspansiyon sisteminden oluşan montajı dinamik modelleme için MATLAB programına aktarılmıştır. Tasarlanmak istenen aktif süspansiyon sistemi için aracın yoldan gelen uyarılara verdiği tepkiler incelenmiştir. Yapılan incelemelere göre aktif süspansiyon sistemi elemanları yani hidrolik eyleyici ve kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan aktif süspansiyon sisteminde süspansiyon yer değiştirmesi denetlenmiştir. PID ve bulanık mantık olmak üzere iki kontrolcü denetleyici olarak tasarlanmıştır. Süspansiyon yer değiştirmesi, araç gövdesi yer değiştirmesi, ivmesi, savrulma, kafa vurma ve yalpa açıları ile eyleyici sisteminin basınç, debi değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar pasif süspansiyon sistemi, PID ve bulanık mantık kontrol yöntemleri uygulanan aktif süspansiyon sistemine sahip taşıt modelleri ile karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

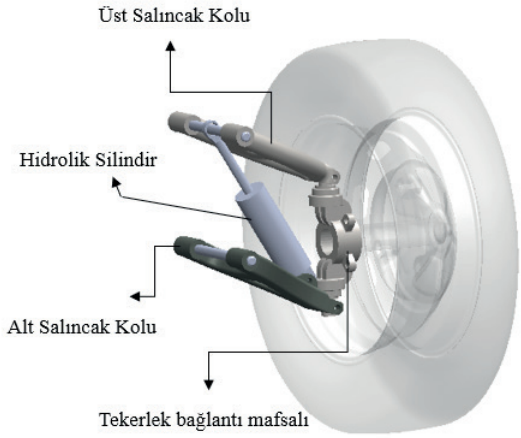
5.1 ARACIN KATI MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Aracın katı modeli gövde, süspansiyon sistemi ve tekerlek olmak üzere 3 parça montajdan oluşmaktadır. Pasif süspansiyon sistemine sahip araç gövdesi ve tekerlekler "Grabcad" adlı katı model paylaşım sitesinden elde edilmiştir (Engineering, 2011). Bu katı model MATLAB/Simulink programına aktarılarak, bu programda kullanılacak şekilde güncellemeler yapılmıştır. Aracın katı modeli süspansiyon montajı, gövde ve tekerlek parçaları montaj ilişkileri ile tam taşıt modeline uygun bir şekilde hazırlanmıştır. Elde edilen tam taşıt katı modelinde, kütle ve kütle merkezi gibi parametrelere dikkat edilmiştir. "Multibody" arayüzünde SolidWorks programında aktarılan model katı model yapısında olduğu için süspansiyona ve tekerleğe yay ve sönüm elemanı eklenmiştir. Çalışmada aktif ve pasif araç modelleri birbiriyle karşılaştırıldığı için aktif süspansiyona sahip araç modeline elektro-hidrolik valf-silindir sistemi "Simscape Fluids" kütüphanesindeki elemanlar kullanılarak ilave edilmiştir. Eyleyici sistemi sistem kuvvet ve hız değerleri dikkate alınarak boyutlandırılmış ve modelde bu tasarım değerleri kullanılmıştır.

Süspansiyon sistemi alt salıncak kolu, üst salıncak kolu, tekerlek bağlantı mafsalı ve hidrolik silindir olmak üzere dört parçadan oluşturulmuştur. Şekil 3' te tam taşıt modeli ve aktif süspansiyon sisteminin montaj hali görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi bu modelleme tekniğinde ilgili parçalar taşıt üzerindeki konumlarına ve bağlantı şekillerine uygun şekilde monte edilmiş halde kullanılmıştır. Elde edilen modelin MATLAB/Simulink modelinin blok şeması Şekil 4' de sunulmuştur.

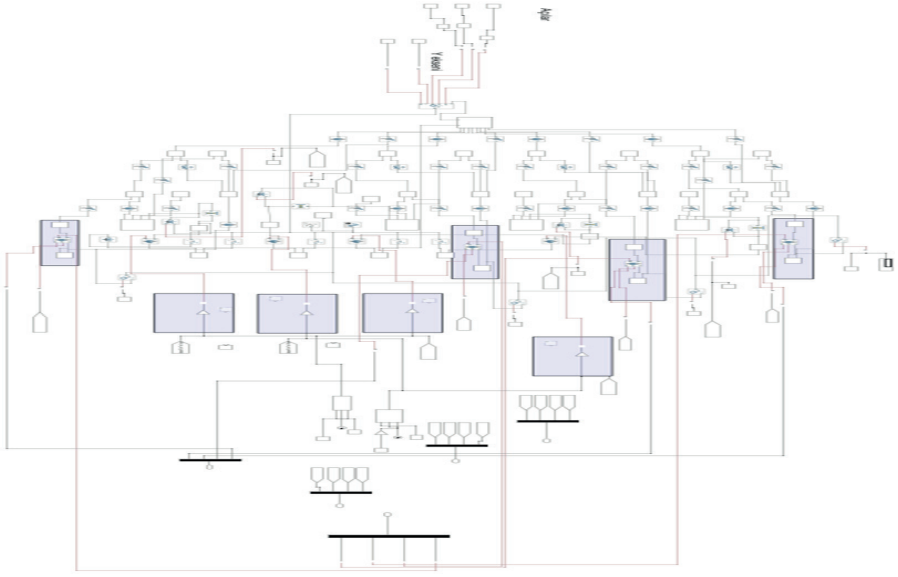


a) Tam taşıt modeli



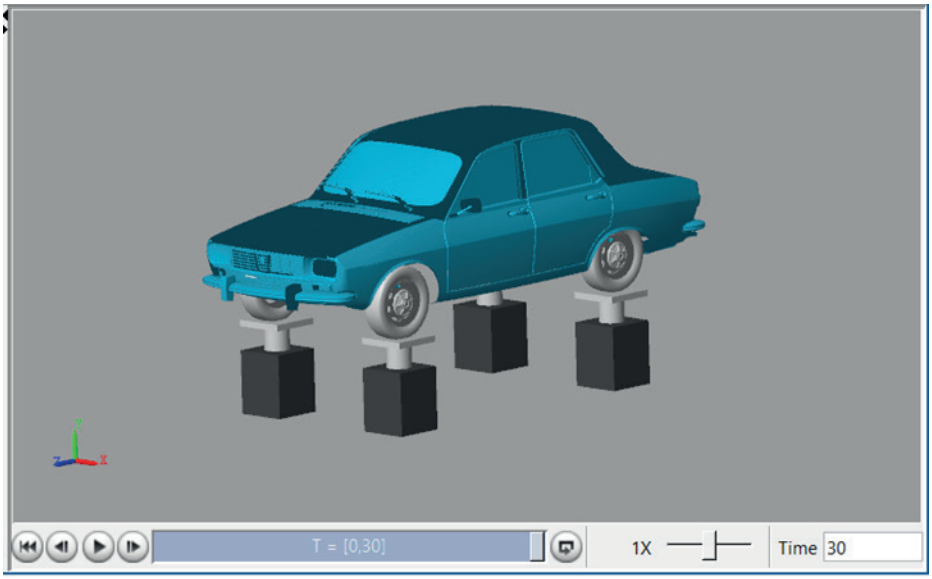
b) Aktif süspansiyon sistemi montajlı gösterimi

Şekil 3. *Aracın tam taşıt modeli ve çift salıncaklı aktif süspansiyon sistemi katı modeli*



Şekil 4. *Aracın tam taşıt modeli*

Aracın MATLAB ortamında dinamik davranışını daha gerçekçi şekilde değerlendirebilmek için animasyon oluşturulmuştur. Şekil 5' te aracın 3D animasyon görüntüsü verilmiştir. Bu şekilde aracın hareketi görsel olarak da izlenebilmiştir.



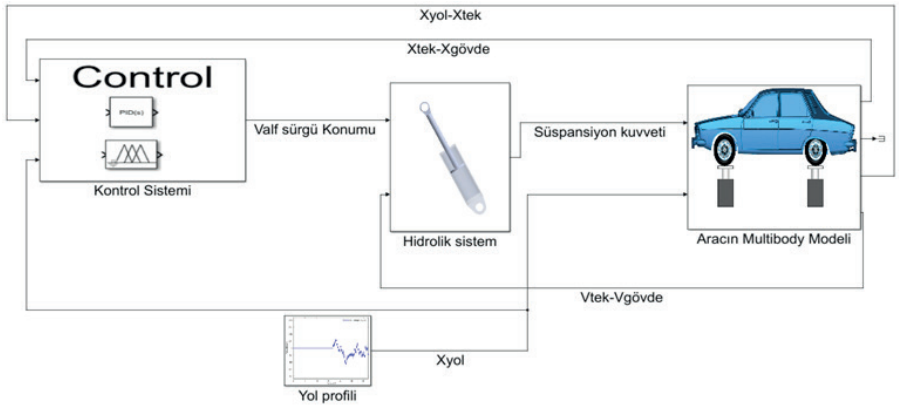
Şekil 5. *Aracın MATLAB ortamında 3D animasyonu*

5.2 YOL SİMÜLATÖRÜ

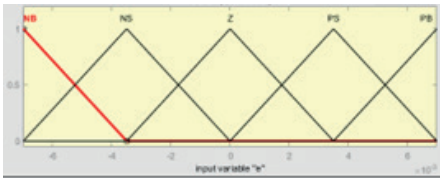
Farklı yol senaryolarının araca uygulanabilmesi için, tekerleklere dikey yönde etki eden dört adet eyleyici kullanılmıştır. Bu eyleyicilerinde SolidWorks programında katı modeli oluşturulup, MATLAB programına aktarılmıştır. Eyleyicilerin hidrolik silindir yapısına benzer şekilde katı modeli elde edilmiştir. MATLAB programında yol senaryoları, bu eyleyicilere yer değiştirme girdisi olarak verilmiştir. Bu simülatördeki eyleyiciler kinematik olarak ele alınmıştır. Eyleyicinin hareketine sebep olan dinamik davranışları hesaba katılmamıştır. Şekil 4' de tekerleklerle temas halinde olan dört blok yol simülatörlerini temsil etmektedir.

5.3 DENETİM SİSTEMİ

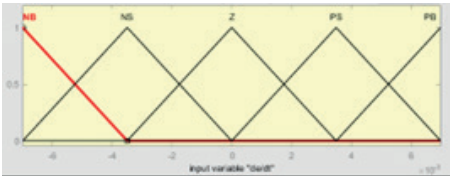
Aktif süspansiyon sistemine sahip taşıt sisteminde süspansiyon yer değiştirmesinin kontrolü hedeflenmiştir. Aktif süspansiyon sisteminin denetiminde PID ve bulanık mantık olmak üzere iki farklı kontrolcü kullanılmıştır. Kurulan denetim şemasında denetim organı çıkışı valf sürgü konumu değişimi olarak alınmıştır. Şekil 6' da aktif süspansiyon sistemine sahip tam taşıt sisteminin modeli gösterilmiştir. Bulanık mantık kontrolcü tasarımı MATLAB programının "Fuzzy Logic Toolbox" kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen hata değeri (e) ve hata değeri değişimi (de/dt) giriş olarak verilmiştir. 'Mamdani' çıkarım yöntemi kullanılmıştır. Bulanıklaştırma için kümelere NB (Negatif büyük), NS (Negatif küçük), Z (0), PS (Pozitif küçük), PB (Pozitif büyük) değişkenleri atanmıştır. Bu değişkenler sunucunda 25 adet kural elde edilmiştir. Kural tablosu Tablo 2' de üyelik fonksiyonları Şekil 7' de gösterilmiştir (Tutar, 2023).



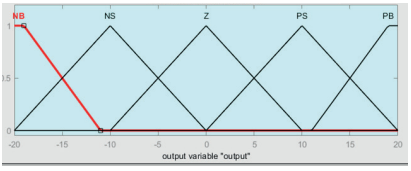
Şekil 6. *Aktif süspansiyon sistemine sahip tam araç modeli*



a) Hata değeri için üyelik fonksiyonu



b) Hatanın değişimi için üyelik fonksiyonu



c) Çıkış değeri için üyelik fonksiyonu

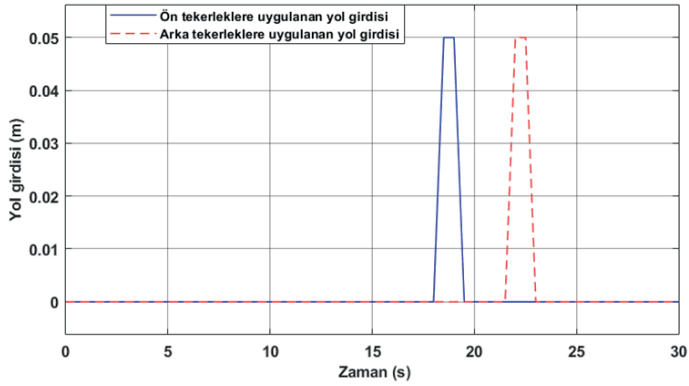
Şekil 7. *Üyelik fonksiyonları*

Tablo 2. *Bulanık mantık kural tablosu*

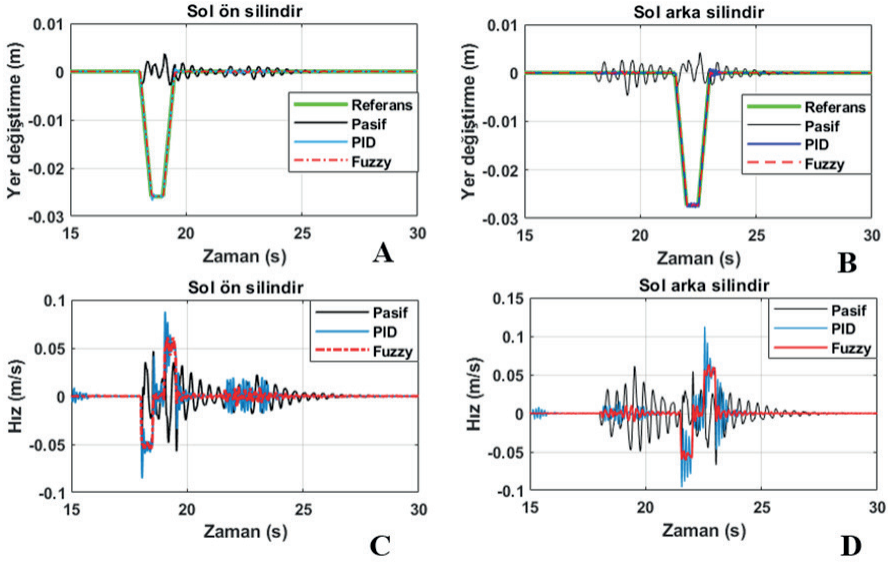
e / de/dt	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NB	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PB	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

5.4. SİSTEM CEVABININ İNCELENMESİ

Süspansiyon yapılarının taşıtların dinamik davranışı üzerine olan etkilerinin incelenmesinde genelde tercih edilen yol senaryolarının tümsek, çukur, basamak giriş, sinusoidal ve rastgele giriş sinyali tipleri olduğu söylenebilir. Bu bölümde tümsek yol girdisine göre pasif ve aktif sisteme sahip araç modelinin dinamik davranış cevabı incelenmiştir. Tümsek giriş yol senaryosu MATLAB programında "Signal Builder" bloğu kullanılarak oluşturulmuştur. Yol senaryoları, aracın dinamik modelinin denge durumuna ulaşmasından sonra uygulanmıştır. Tümsek yol profili için aracın ön ve arka tekerleklerine 0,05 m yüksekliğinde tümsek yol profili tanımlaması yapılmıştır. Şekil 8' de aracın ön ve arka tekerleklerine uygulanan tümsek yol senaryosu gösterilmiştir.

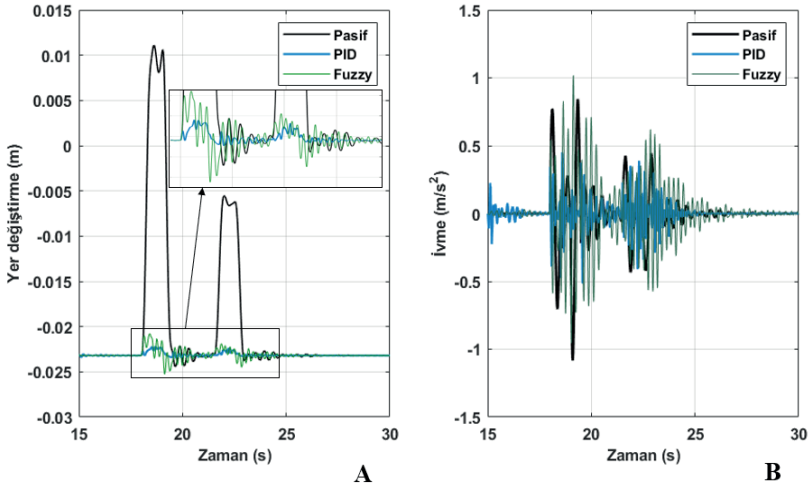


Şekil 8. *Ön ve arka tekerleklere uygulanan tümsek yol senaryosu*

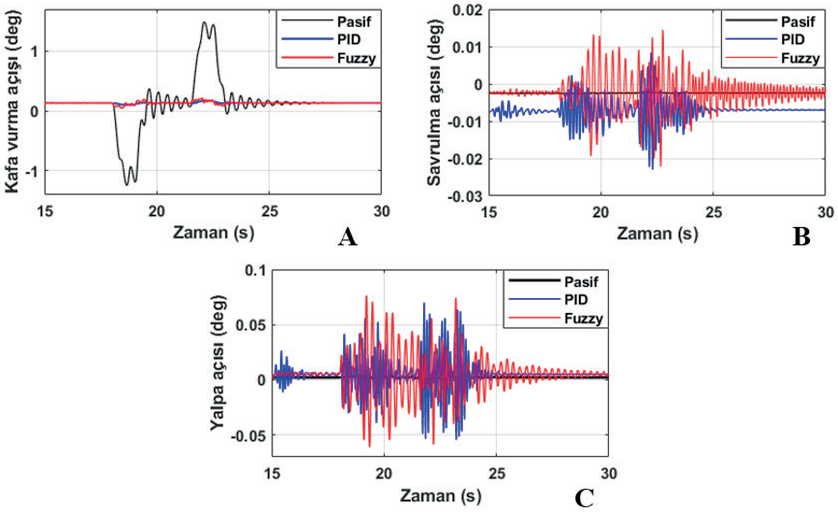


Şekil 9. *Sol ön ve arka süspansiyonun dinamik davranışları A) Sol ön süspansiyon yer değiştirmesi B) Sol arka süspansiyon yer değiştirmesi C) Sol ön süspansiyon hızı D) Sol arka süspansiyon hızı*

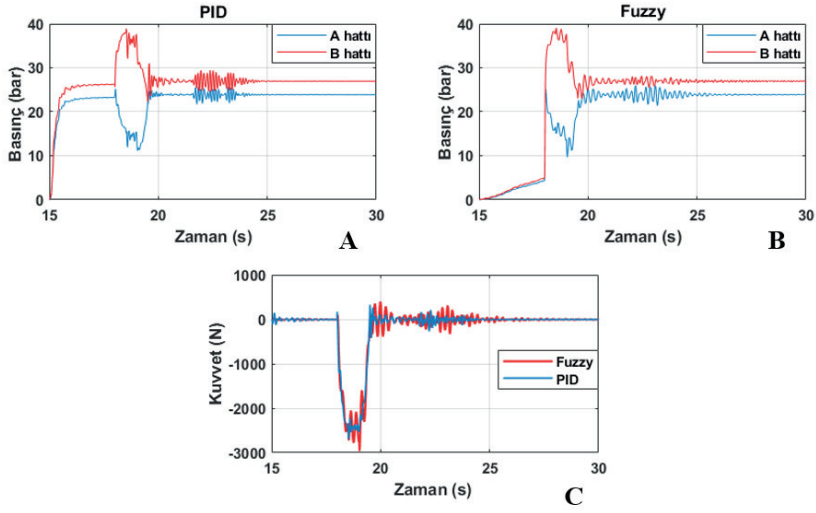
Şekil 9' da sol ön ve sol arka süspansiyonların yer değiştirmesi ve hızı verilmiştir. Şekil incelendiğinde incelendiğinde PID ve bulanık mantık kontrolcüsü ile kontrol edilen süspansiyon sistemleri referans giriş değerini takip ettiği görülmüştür. İki kontrolcü de birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Ancak arka süspansiyon sistemi pasif sistemde ön süspansiyona girilen bozucu yol girdisinden etkilenmektedir. Bu nedenle pasif süspansiyon sistemi 17. saniyeden itibaren referans değerin dışına çıkmıştır. PID ve bulanık mantık kontrolcüleri yol girdisinin etkisini pasif süspansiyon sistemine göre önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Aracın y-ekseninde yapmış olduğu ivmelenme performansında PID tabanlı kontrol sisteminin pasif sisteme ve bulanık mantık ile kontrol edilen sisteme göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Araç gövdesinin ön yol girdisinden önemli ölçüde etkilendiği de gözlemlenmiştir. Şekil 10' da aracın ağırlık merkezinin yer değiştirmesi ve ivme değişimi cevabı gösterilmiştir. Şekil 11' de aracın kafa vurma, savrulma ve yalpa hareketleri verilmiştir. Aracın kafa vurma açısını iki kontrolcü de pasif sisteme göre önemli derecede azaltmıştır. Ancak savrulma ve yalpa açılarında pasif sistem daha iyi cevap vermiştir. PID ve bulanık mantık kontrolcülerinde ise ihmal edilebilir değişimler mevcuttur. Şekil 12' de sol ön hidrolik silindire ait basınç ve kuvvetler verilmiştir.



Şekil 10. *Aracın ağırlık merkezi dinamik davranışları*
A) y eksenindeki araç gövdesi yüksekliği B) y eksenindeki araç gövdesi ivmesi



Şekil 11. *Aracın dönme hareketleri A) Kafa vurma açısı B) Savrulma açısı C) Yalpa açısı*



Şekil 12. *Sol ön hidrolik silindire ait basınç ve kuvvet değerleri*
A) PID kontrolcü kullanılan yapıda oluşan basınç değişimi
B) Bulanık mantık kontrolcü kullanılan yapıda oluşan basınç değişimi
C) Her iki kontrolcü için kuvvet değeri

SONUÇ

Bu çalışmada pasif süspansiyona sahip bir taşıt modeli ile elektro-hidrolik eyleyicili aktif süspansiyon sistemine sahip taşıt modellerinin dinamik davranışının incelenmesi için kullanılan yöntem detaylı olarak sunulmuştur. Çalışmanın özellikle sistem dinamiği ve modelleme ile çalışan araştırmacılara bir kaynak olması hedeflenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında inceleme için seçilen sedan aracın bileşenlerinin katı modeli SolidWorks programında kurularak montajlanmıştır. Kurulan bu model sistemin dinamik davranışının incelenmesi ve kontrolünün gerçekleştirilmesi amacıyla MATLAB/Simulink programına aktarılmıştır. Burada çok cisimli modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım ile tam taşıt modeli gerçek taşıt modelindeki yapıya benzer boyutlardaki elemanları ve montaj şeklinin benzerinin kullanılmasına izin verdiği için sıklıkla kullanılan çeyrek, yarım ve tam taşıt modeli yaklaşımlarına göre daha gerçekçi bir yaklaşım ile modelleme yapılmasına imkan sağlamıştır. İkinci aşamada tasarımı yapılan elektro-hidrolik valf-silindir sistemi MATLAB/Simulink/Simscape/Fluids ortamında modellenerek taşıt modeli ile birleştirilmiştir. Üçüncü aşamada aktif süspansiyona sahip taşıt modeli için PID ve bulanık mantık denetleyicisi tasarlanmıştır. Pasif ve aktif süspansiyon sistemine sahip araç modellerinin dinamik davranış cevapları tümsek bir yol senaryosunun sisteme bozucu giriş olarak verilmesiyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Çok cisimli modelleme tekniği ile oluşturulan tam taşıt modeli ile aracın tüm eksenlerdeki doğrusal ve dönme hareketleri incelenebilmiştir. Bu modülün programın diğer alt modülleri ile de çalışabilmesi sebebiyle modelin farklı şekillerde uyarlaması yapılarak genişletilmesi mümkün hale gelebilmiştir. Bu durum kullanıcıya daha esnek çalışma imkanı sunmuş ve kullanılan animasyon modülü ile de sistemin çalışmasının görsel olarak da daha gerçekçi bir şekilde incelenmesine imkan vermiştir.

KAYNAKLAR

Altun, Y. (2017). Çeyrek taşıt aktif süspansiyon sistemi için LQR ve LQI denetleyicilerinin karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5(3), 61–70.

Çetinkaya, S. (2017). Taşıt mekaniği. Ankara: Nobel Yayıncılık.

Els, P. S., Theron, N. J., Uys, P. E. ve Thoresson, M. J. (2007). The ride comfort vs. handling compromise for off-road vehicles. Journal of Terramechanics, 44(4), 303–317.

Engineering, M. (2011). Renault 12 gordini. Erişim adresi: https://grabcad.com/library/renault-12-gordini.

Ercan, Y. (2009). Mühendislik sistemlerinin modellenmesi ve dinamiği. İstanbul: Literatür.

Erzan Topçu, E., Yüksel, İ., Kamış, Z., (2002). Taşıt Süspansiyon Sistemlerindeki Gelişmeler. Otomotiv Teknolojileri Kongresi (OTEKON2002) (pp.313-321). Bursa, Türkiye.

Goodarzi, A. ve Khajepour, A. (2017). Vehicle suspension system technology and design. Cham: Morgan & Claypool Publishers.

Homayoun, B., Arefi, M. M., Vafamand, N. ve Yin, S. (2020). Neural minimal learning backstepping control of stochastic active suspension systems with hydraulic actuator saturation. Journal of the Franklin Institute, 357(18), 13687–13706.

Kılıçaslan, S. (2018). Control of active suspension system considering nonlinear actuator dynamics. Nonlinear Dynamics, 91(2), 1383–1394.

Martins, I., Esteves, J., Marques, G. D. ve da Silva, F. (2006). Permanent-magnets linear actuators applicability in automobile active suspensions. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 55(1), 86–94.

MathWorks-Simscape Multibody. Erişim adresi: https://www.mathworks.com/products/simscape-multibody.html (Erişim tarihi: 23.12.2023).

MEB. (2013). Motorlu araçlar teknolojisi süspansiyon sistemleri. Erişim adresi: https://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Süspansiyon%20Sistemleri.pdf (Erişim tarihi: 23.12.2023).

Mehta, J. S. ve Kailey, A. S. (2018). Mechanical vibrations. New Delhi: S. Chand & Company Limited.

Şengirgin, M., Yüksel, İ., Erzan Topçu, E., Şefkat, G., Şiren, M.N., (2000). Pasif ve Yarı Aktif Süspansiyon Sistemlerinin Titreşim Yalıtım Performansının İncelenmesi. 9. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi UMTİK'2000 (pp.1-10). Ankara, Türkiye.

Tian, M. ve Nguyen, V. (2020). Control performance of suspension system of cars with PID control based on 3D dynamic model. Journal of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, 1(1), 1–10.

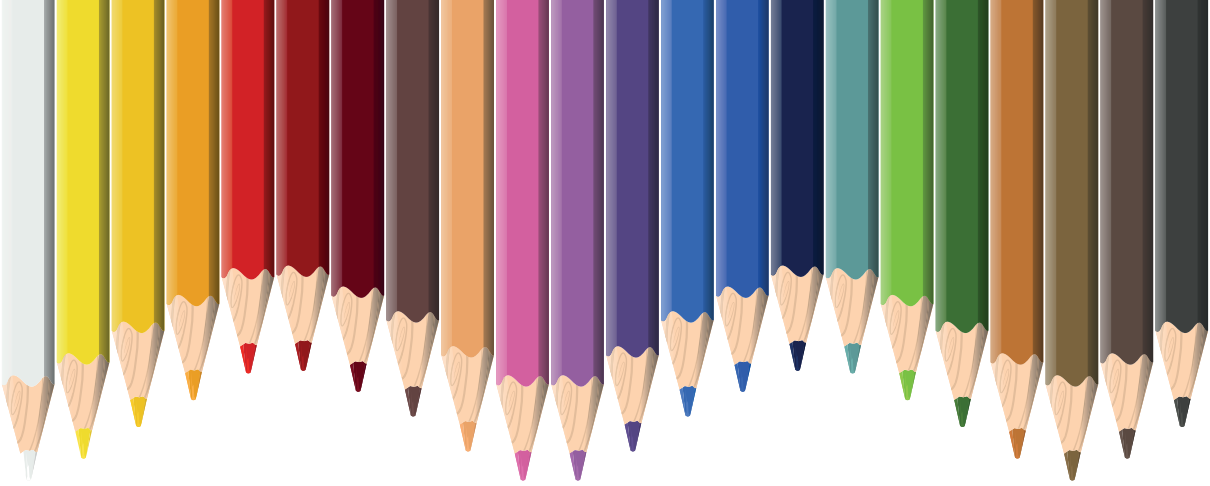
Tutar, L. (2023). Elektro-hidrolik eyleyicili aktif süspansiyon sistemine sahip bir taşıtın modellenmesi ve kontrolü (Yayınlanmış yüksek lisans tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Yang, Z., Shi, C., Zheng, Y. ve Gu, S. (2022). A study on a vehicle semi-active suspension control system based on road elevation identification. Plos one, 17(6), e0269406.

Yenasoft. (t.y.). SolidWorks nedir? Erişim adresi: https://www.yenasoft.com/blog/solidworks-nedir/. Erişim tarihi: 23.12.2023.

Yüksel, İ. (2017). Matlab ile mühendislik sistemlerinin analizi ve çözümü. Bursa: Dora Yayıncılık

Yüksel, İ. (2018). Otomatik kontrol sistem dinamiği ve denetim sistemleri. Bursa:Dora Yayıncılık.



Bölüm 13

ZEOLİTLERİN VE ZEOLİT KATALİZÖRLERİN ASİT-BAZ KARAKTERİZASYONLARINDA KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİSİ (IR) UYGULAMALARI

Ceyda BİLGİÇ[1]

1 Doç. Dr., Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, Orcid No: 0000-0002-9572-3863

1. GİRİŞ

Zeolitin IR Spektrumu, zeolitlerdeki asit bölgelerine ilişkin temel bilgileri ortaya koymaktadır. Örneğin, Bronsted asit ve silanol gruplarını bağlayan absorpsiyon bandı spektrumda görünür ve bu, asit bölgelerinin varlığını doğrulamamıza yardımcı olur. Bununla birlikte, asitlik tek başına asidin incelenmesiyle değerlendirilemez; bir baz molekülünün etkileşimi ile araştırılması gerekir. Prob molekülleri asit gücü ve asit bölgelerinin konsantrasyonu hakkında daha fazla bilgi edinmemize yardımcı olabilir. Zeolitteki asit bölgelerinin karakterizasyonu için sıklıkla kullanılan çok sayıda prob molekülü vardır, ancak çalışmalarda genellikle asit gücü ve konsantrasyonun araştırılması için prob molekülleri olarak karbon monoksit ve piridin seçilmiştir. Her ikisi de uygulamalarda en yaygın kullanılan yöntemlerdir; dolayısıyla çok sayıda literatür ve önceki deneysel veriler mevcuttur (Han vd., 1999). Özellikle piridin için toplam (entegre) molar tükenme katsayısı (IMEC) değerleri asit bölgelerinin konsantrasyonunun araştırılması için gereklidir ve değerler arasındaki fark oldukça büyük olsa da, bunlar birçok farklı literatürden temin edilebilir (Chittur, 1998; Göbel vd., 1995; Wolf vd.,1999; Süer vd, 1996; Hedlund vd., 2004; Fox vd., 2004; Sun vd., 1996; Clark vd., 2004; Yang ve Rees, 1997; Song ve Rees, 2000, Li ve Talu, 1993; Byrappa ve Kumar, 2007).

Aktive edilmiş zeolit örneklerinde, en çok ilgi çeken pikler genellikle 3750 cm^{-1} ve 3610 cm^{-1} arasındaki dalga sayısında ortaya çıkmıştır. H-IM-5 zeolitinin aktifleştirilmiş spektrumu örnek olarak gösterilebilir. Genellikle 3750-3745 cm^{-1}'de gözlenen bant dış yüzeylerdeki izole silanol gruplarına atfedilir (Han vd., 1999; Byrappa ve Kumar, 2007). Bu pik aslında dar ve simetrik olmasına rağmen, bu dalga sayısında alt bölgeye doğru kuyruğu olan asimetrik pik gözlenmiştir. Bunun nedeni, hidrojene bağlı bir zincirin terminal silanol gruplarının izole edilmiş olanlardan biraz daha düşük dalga sayısında görünmesidir. İzole ve terminal silanol gruplarının tanımı bulunabilir. Bir diğer önemli absorpsiyon bandı, hidroksil gruplarının (-Al(OH)Si-) bağlanmasının gerilme bandı olan 3625-3610 cm^{-1}'de gözlenmektedir (Byrappa ve Kumar, 2007). 2100 cm^{-1} ve 1500 cm^{-1} arasındaki aralıkta, zeolit kafes titreşimlerinin üst tonları (T-O birimlerinin (T = Si veya Al) gerilme ve bükülme bantları) ortaya çıkar (Han vd., 1999).

FTIR spektroskopisi, esas olarak organik ve inorganik malzemelerin hem kalitatif hem de kantitatif ölçümleri için kullanılan analitik bir tekniktir. FTIR, çeşitli dalga boylarında kızılötesi radyasyonun absorplanmasından dolayı bir moleküldeki farklı kimyasal bağları tanımlamak için kullanılır. Zeolitlerin fonksiyonel gruplarının karakterizasyonuna yardımcı olmanın yanı sıra, FTIR spektroskopisi küçük yapısal değişikliklerden kaynaklanan titreşimlerin dönüşümü hakkında bilgi sağlamak için de kullanılabilir.

Zeolit çerçevesi SiO_4 ve AlO_4 dörtyüzlülerinden oluşur. AlO_4 dörtyüzlü-

sü, B, Ga, Fe, Ge, Ti gibi diğer üç ve dört değerlikli durum iyonları ile değiştirilebilir. Bu dörtyüzlüler halkalar ve kafesler gibi birincil yapı birimlerini oluşturur ve bu halkalar ve kafesler zeolit çerçevelerini oluşturmak için daha da bağlanır. Her durumda, SiO_4 ve AlO_4 dörtyüzlüleri, iki komşu AlO_4 dörtyüzlünün zeolit yapısındaki bir oksijen köprüsü aracılığıyla bağlanamayacağını belirten Lowenstein kuralına göre birleşir. Zeolit kristalleşmesi üzerine IR spektrumlarında yapıya duyarlı bantların gelişmesi ve kristalizasyonda kullanılan şablon molekülün kimyasal çevresel değişiminin Raman bantlarının gelişmesine yol açması nedeniyle zeolit çerçevelerinin oluşumu IR ve Raman spektroskopisi kullanılarak izlenebilmektedir.

2. ASİDİK ÖZELLİKLER

Zeolitlerin sadece $[SiO_4]^{4-}$ dörtyüzlü biriminden oluştuğunu varsayarsak, SiO_2 kimyasal formülü ile elektriksel olarak nötr bir çerçeveye sahip olacaktır. Ancak, $[SiO_4]^{4-}$ tetrahedronu $[AlO_4]^{5-}$ tetrahedronu ile değiştirilirse, yük dengesi bozulur ve zeolit çerçevede negatif bir yük kazanır. Bunun çerçeve dışı katyonlar tarafından dengelenmesi gerekir. En çok protonun yük dengeleyici bir katyon olarak görev yaptığı ve köprü oluşturan bir Bronsted asit bölgesi (-Si(OH)Al-) oluşturduğu durumla ilgilenmektedirler. Tanım olarak, bir Bronsted asit bölgesi bir proton donörüdür (vericisidir). Bronsted asit bölgesi, bir $[SiO_4]^{4-}$ ile $[AlO_4]^{5-}$ yer değiştirmesi ve ardından yük dengeleme için hidrojen eklenmesiyle oluşur.

Bazı zeolit numuneleri için elektron alıcısı olarak çalışan Lewis asit bölgesi gözlenmiştir. Bu Lewis bölgesi genellikle sistemdeki kafes kusuru veya alüminyum ekstra çerçevesi (EFAl) nedeniyle oluşur.

Zeolitlerde asitlik konusunda genellikle iki şeyin önemli olduğu düşünülür: asit gücü ve asit yoğunluğu. Çalışmada asit gücünü ölçmek için uygulanan yöntem, karbon monoksit (CO) adsorpsiyon deneyi sırasında zeolitin FTIR spektrumlarını gözlemlemektir. Zayıf bazik prob molekülü olarak karbon monoksit, zeolitin asit bölgesinde adsorbe olarak zeolitteki hidroksil grubu ile hidrojen bağı oluşturur ve hidroksil gerilme bandını devam ettirir. Yani, karbon monoksit ile etkileşime girdiğinde hidroksil gerilme bandının kaydığı gözlemlenebilir. Asit gücü, pertürbasyonun derecesi kullanılarak karşılaştırılabilir. Kayma ne kadar büyükse, asit gücü de o kadar güçlüdür. Asit yoğunluğu, katalizörün gram alanı başına asit bölgelerinin konsantrasyonunu ifade eder. Farklı zeolitlerin asit yoğunluğunu araştırmak için prob molekülü olarak piridin kullanılarak zeolitler üzerinde FTIR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Piridin, güçlü bir baz olarak zeolitlerin asit bölgeleriyle etkileşime girer. Bronsted asit bölgesine adsorbe edilen piridinyum iyonunun ve Lewis asit bölgesinde adsorbe edilen piridinin absorbsiyon piklerinden, katalizörün gram alanı başına asit bölgelerinin konsantrasyonu hesaplanabilir.

Literatürde (Knözinger, 2007; Busca, 2007), çeşitli katıların asit özel-

likleri (türü, gücü ve sayısı) amonyak, piridin, sübstitüe piridinler, nitriller, alifatik aminler, eterler, ketonlar, aldehitler, aromatikler, alkenler, karbon monoksit, alkanlar, N_2 ve H_2 gibi çeşitli prob molekülleri, IR spektroskopisi ile incelenmiştir. Her raporda farklı ölçüm koşulları benimsenmiştir ve aynı koşullar altında çok çeşitli katılar üzerinde yapılan bir çalışma eksiktir. Amonyak, piridin ve CD_3CN gibi bir dizi yaygın prob molekülü ile çeşitli katıları IR ile ölçmüşler ve çok çeşitli katıların asit özelliklerini ölçmek için yöntemi araştırmışlardır.

2.1. Asit Bölgelerinin Türü

Katı asit katalizörlerinin asit bölgelerinin türü, yani Bronsted veya Lewis, IR spektroskopisi tarafından, piridin halka bantlarının Bronsted veya Lewis asit bölgeleriyle etkileşimi sebebiyle piridin adsorpsiyonu ile daha önce araştırılmıştır (Tamura vd., 2012; Morterra ve Magnacca, 1996; Lercher vd., 1996). Lewis asit bölgelerinin varlığı, adsorbe edilmiş piridinin sırasıyla ν8a ve ν19b modlarına atfedilen, 1600 ve 1444 cm^{-1} 'deki iki IR bandının gözlemlenmesinden anlaşılmaktadır (Morterra ve Magnacca, 1996; Lercher vd., 1996). Bronsted asit bölgelerinde adsorbe edilen piridinin ν19b modu için beklenen 1540 cm^{-1} civarında gözlenen karakteristik IR bandı olmadığından, güçlü Bronsted asit bölgeleri, yani yüzey asidi OH grupları olmadığını göstermektedir.

Lewis asit bölgelerinde adsorbe edilen piridinin ν8a modu, serbest piridin için 1590 ila 1630 cm^{-1} arasında değişebilir. Genel olarak, adsorbe edilmiş piridinin *ν8a* modu için daha yüksek bir titreşim frekansı, daha güçlü Lewis asit bölgeleriyle ilişkilidir. Örneğin, piridin aktifleştirilmiş bir η-Al_2O_3 üzerine adsorbe edildiğinde (Lundie vd., 2005), sırasıyla zayıf, orta ve güçlü Lewis asit bölgelerine atfedilen 1595, 1613 ve 1623 cm^{-1} 'lerde değişmiş, ν8a modu ile farklı şekilde koordine edilmiş Al bölgeleri olmak üzere, üç tür Lewis bölgesi gözlenmiştir.

Asit Bölgelerinin Gücü: Güçlü bir baz olarak piridin, asit bölgelerinin türlerini ayırt edebilir (Morterra ve Magnacca, 1996). Piridinin katıların üzerindeki adsorpsiyonunda, küplerin ve sekizyüzlülerin üzerindeki Lewis asit bölgelerinin gücünü ayırt etmez. Asetonitril gibi daha zayıf bir baz molekülü, metal oksitler üzerindeki asit bölgelerinin asitliğindeki küçük farklılıklara karşı daha duyarlı olabileceğinden, asit bölgelerini daha fazla araştırmak için prop olarak seçilmiştir (Morterra ve Magnacca, 1996; Lercher ve diğerleri, 1996). Çalışma, υ(CN) modu ile δ(CH_3) + υ(CC) kombinasyon modu arasında normal asetonitril (CH_3CN) ile meydana gelen Fermi rezonansının neden olduğu spektroskopik sorunlardan kaçınmak için döteryumlanmış asetonitril (CD_3CN) kullanıldığını göstermiştir. Knoezinger ve Krietenbrink (1975) tarafından belirtildiği gibi, oda sıcaklığında desorpsiyondan sonra, katıların üzerine adsorbe edilen CD_3CN'den υ(CN) bölgesindeki IR spektrumlarını

karşılaştırdılar (Knoezinger, ve Krietenbrink, 1975). Sıvı CD_3CN'nin υ(CN) modu 2260 cm^{-1} civarında bulunur ve normalde Lewis asit bölgeleriyle etkileşimi üzerine 70 cm^{-1} kadar kayma gösterir (Tamura vd., 2012; Morterra ve Magnacca, 1996; Lercher vd., 1996; Knoezinger ve Krietenbrink, 1975; Tamura vd., 2012). Gösterildiği üzere, adsorbe edilen asetonitrilin ana υ(CN) modu, kristaller ve küpler için 2265 cm^{-1} civarında bir omuz piki ile 2280 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. 2000 cm^{-1}'lik kayma (2260 cm'den 2280 cm^{-1}'ye), alümina gibi diğer asidik metal oksitlerle asetonitril etkileşimine kıyasla oldukça küçüktür (50 cm^{-1}'den fazla), (Escalona Platero vd., 1999) ancak polikristalin seryum üzerinde asetonitril adsorpsiyonundan gözlemlenenle tutarlıdır (Tamura vd, 2012; Tamura et al., 2012) ve seryum yüzeylerinin zayıf Lewis asiditesine işaret etmektedir. Asetonitril ve Bronsted asit bölgeleri arasındaki etkileşim de benzer şekilde küçük bir kaymaya neden olabilse de (Tamura et al., 2012), yukarıdaki piridin sonuçlarına dayanarak bu olasılık hariç tutulmuştur. Buna ek olarak, seryum kristalleri ve küpleri, oktahedraların sahip olmadığı ek zayıf Lewis bölgelerine (2165 cm^{-1}'de υ(CN)) sahiptir. Sonuç olarak asetonitril probu, asit gücüne piridinden biraz daha duyarlıdır.

Oksit katalizörler üzerindeki asit bölgelerinin gücünü ve miktarını karakterize etmek için bir yaklaşım olarak, NH_3-TPD ile katı üzerindeki Lewis asit bölgelerinin belirlenmesi yöntemi denenmiştir (Tamura vd., 2012; Lercher vd., 1996). TPD, 673 K'de önceden kalsine edilmiş zeolit katalizörler üzerinde 373 K'de NH_3 adsorpsiyonundan sonra gerçekleştirilmiştir. NH_3 'nin zeolit katalizörler üzerindeki desorpsiyon profilleri, 373-773 K sıcaklık aralığında ayırt edilebilir bir özellik göstermemiştir, bu da yine bu katalizör yüzeylerinin zayıf asitliğine işaret eder. Asit bölgelerinin NH_3-TPD ile miktarının belirlenememesi, katalizörler üzerindeki zayıf Lewis asit bölgelerini ölçmek için mikrokalorimetri gibi farklı yöntemleri kullanarak daha fazla çalışma yapılmasını gerektirmektedir.

2.2. Bronsted ve Lewis Asit Bölgeleri

Bronsted asit bölgeleri IR spektroskopisi kullanılarak prob molekülleri ile ve prob molekülleri olmadan incelenebilirken, Lewis asit bölgeleri sadece prob molekülleri yardımıyla incelenebilir. Prob molekülleri kullanıldığında Bronsted asit bölgeleri için Raman spektroskopisi de kullanılabilir (Chizallet vd., 2006). Bronsted ve Lewis asitlik ölçümleri için, ideal olarak, reaktif (tepkimeye giren) moleküllerinin prob molekülleri olarak kullanılabilmesi en iyisidir. Ancak, çoğu durumda bu zordur. Prob molekülünün seçimi incelenen sisteme bağlıdır, ancak asitlik verilerini katalizör performansıyla ilişkilendirmek için, prob ve reaktif molekülleri arasındaki farklılıklar akılda tutulmalıdır. Lercher ve arkadaşları (1996) katı asitler için uygun bir prob molekülü seçme kriterlerini özetlemiştir. Prob molekülü kuvvetli bazik ve oldukça zayıf asidik özelliklere sahip olmalı ve Bronsted ve Lewis asit bölgelerini ayırt edebilmeli ve aynı tipte ancak farklı güçlerdeki asit bölgelerini ayırt edebilmeli-

dir (Lercher vd., 1996). Yapı kısıtlamalarının etkilerini en aza indirmek için probun boyutu reaktanın boyutuyla karşılaştırılabilir olmalıdır.

Literatürde zeolit asitliği ölçümleri için amonyak, piridin, n-butilamin, asetonitril, benzen, karbon monoksit, aseton, aldehit, eter, alkanlar ve alkenler gibi birçok prob molekülü rapor edilmiştir (Lercher vd., 1996). Farklı bazikliklere sahiptirler ve farklı deneysel koşullar altında kullanılırlar. Her birinin kendine has özellikleri ve dezavantajları vardır. Çok yakın zamanda, N_2, H_2 ve CH_4 gibi küçük moleküller de asitlik için prob molekülleri olarak kullanılmıştır. Zeolitlerin dış yüzeyindeki asitliği ölçmek için, küçük zeolit gözeneklerine nüfuz edemeyen büyük hacimli prob molekülleri kullanılmaktadır (Jacobs vd., 2001).

Piridin mükemmel bir probtur (Ratnasamy et al, 1996; Ratnasamy ve Singh, 2008) çünkü (1) piridin, Bronsted asit bölgeleriyle etkileşime girerek piridinyum iyonunu, PyH^+ oluşturur ve piridin, IR spektrumunda karakteristik absorpsiyon bantları vermek üzere Lewis asit bölgelerine adsorbe olur (Ratnasamy ve Singh, 2008) ve (2) bir prob olarak piridin, farklı güçlere sahip Lewis asit bölgelerini ayırt eder ve (3) piridinyum termal olarak kararlıdır. Asidik ZSM-5 zeoliti üzerine adsorbe edilmiş piridinin tipik bir IR spektrumu; 1540 cm^{-1}'deki bant Bronsted asit bölgelerindeki piridinden kaynaklanırken, ~1450 cm^{-1}'deki bant Lewis asit bölgelerinde adsorbe edilen piridin ile ilişkilidir. Her iki bant da piridinin n_{19b} halka deformasyon modundan kaynaklanmaktadır. Spektral bölgedeki 1580-1660 cm^{-1}, n_{8a} ve n_{8b} halka titreşimlerinden kaynaklanan çoklu bantlar (Wu vd., 2012), farklı Bronsted ve Lewis asit bölgelerinde adsorbe edilen piridini ayırt etmek için de kullanılabilir. Bronsted asit bölgeleri esas olarak çerçeve içi alüminadan kaynaklanırken, Lewis asit bölgeleri dehidroksilasyon üzerine oluşan üç koordinatlı çerçeve içi alüminadan (hiçbir zaman doğrudan gözlemlenmemiştir), deluminasyon sırasında oluşan çerçeve dışı alüminadan ve yük dengeleyici katyonlardan kaynaklanabilir.

Bronsted asit gücü, çerçevenin yük yoğunluğu (Wu vd., 2012) ve zeolit çerçevelerin Sanderson elektronegatifliği (Guisnet ve Guidotti, 2009; Kale ve Singh, 2002; Hölderich ve Van Bekkum, 2001) ile ilişkilendirilmiştir; bu, Bronsted asit gücü için uzun vadeli bir etkileşim ve kolektif bir olgu olduğunu göstermektedir. Ancak, son araştırmalar (Swift, 2008; Corma vd., 2007; Tatsumi; 2001; Dahlhoff vd., 2001) yerel konfigürasyonun da önemli olduğunu göstermektedir. Datka ve arkadaşları (1988) benzen gibi bir prob molekülü kullanarak zeolitlerde Bronsted asitliğinin oldukça heterojen olduğunu bulmuştur (Datka vd., 1988).

Prob molekülleri ve IR spektroskopisi kullanılarak, Bronsted ve Lewis asit bölgelerinin bağıl asit güçleri, prob moleküllerinin adsorpsiyonu ve desorpsiyonu üzerine OH gruplarının bant konumu kaymalarının izlenmesi

yoluyla ortaya çıkarılabilir. Genel olarak, OH bantlarının daha düşük dalga sayısına kayması ne kadar büyük olursa, asit kuvveti o kadar güçlü olur. Adsorplanan probun desorpsiyon sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, asit kuvveti de o kadar güçlü olur. Diğer Lewis asit bölgeleri ile karşılaştırıldığında, yük dengeleyici katyonlar Lewis asitleri için zayıftır ve desorpsiyon üzerine prob molekülünün kolaylıkla uzaklaştırılabileceğini gösterir.

Bununla birlikte, yukarıda verilen yöntemler kullanılarak asit gücü çalışmaları yapılırken komplikasyonlarla karşılaşılabilir: (1) farklı zeolit yapılarının prob molekülüne farklı sterik engellemesi ve (2) piridinin azotunun yalnız elektron çiftinin bir Lewis asit bölgesine eşzamanlı koordinasyonu ve piridin halkasının komşu OH grubuna hidrojen bağlanması (Liu vd., 1998). İlk durumda, prob moleküllerinin asit bölgesi ile etkileşimi zayıf olurken, ikinci durumda prob molekülünü uzaklaştırmak için yüksek desorpsiyon sıcaklığı gereklidir.

3. BAZİK ÖZELLİKLER

Katıların bazik özellikleri, CO_2, SO_2, metan, asetilen, pirol, kloroform, alkoller ve tioller gibi asidik prob molekülleri ile IR ile incelenmiştir (Lavalley, 1996; Busca, 2010). Bununla birlikte, asitlik karakterizasyonuna kıyasla, bazik katıların IR karakterizasyonu daha az araştırılmıştır. Bu nedenle, çok çeşitli katılar için genel prob molekülleri araştırılmalıdır. Genel olarak, bazik katılar iyoniktir ve sonuç olarak, bazik bölgeye (yüzey oksijeni) bitişik Lewis asit bölgesine (açıkta kalan metal katyonu) sahiptirler. Katalitik uygulamalarında, bazik katıların katalizinde sadece bazik bölgelerden ziyade asit-baz çifti bölgeleri önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, katıların asit-baz çifti bölgesiyle etkileşime girebilen moleküller, bazik katıların karakterizasyonu için prob molekülleri olarak uygundur. Örneğin, benzaldehit katıların asit-baz çifti bölgesi için prob molekülü olarak kullanılmıştır (Niwa, 1985; Niwa, 1991). Nitrobenzen de katıların asit-baz çifti bölgesi ile etkileşime girer (Shimizu, 2009).

3.1. Bazik Alanların Türü

Zeolitlerdeki bazik bölgeler, bazik hidroksiller (Bronsted bazik bölgeler), bazik oksijenler (Lewis bazik bölgeleri), zeolit kafeslerindeki bazik alkali metal oksitler ve $Na_n^{(m-1)+}$ ve $K_n^{(m-1)+}$ gibi metal kümeleridir, burada n, $m \leq 4$ ve $m < 4$'tür (Thomas, 1993; Edwards vd., 1996). En önemli bazik bölgeler çerçeve oksijenlerdir ve Sanderson elektronegatiflik ara değeri ile nitel olarak tanımlanabilir. Barthomeuf (Barthomeuf, 1991; Barthomeuf, 1996) ve son zamanlarda Davis (Davis, 2003) zeolit bazikliğinin çeşitli yönlerini ve katalizdeki uygulamalarını gözden geçirdiler.

Zeolitlerin bazikliği, çerçevedeki Al'un varlığından kaynaklanan çerçeve negatif yükünden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, homolog bir zeolit seri-

sinde, daha düşük çerçeve Si/Al oranına sahip zeolitler, daha yüksek çerçeve Si/Al oranına sahip olanlardan daha bazik olabilir. Alkali metal katyonlarının eklenmesi zeolitlerin bazikliğini artırır ve Cs gibi daha bazik katyonlar daha etkilidir (Barthomeuf, 1991; Barthomeuf, 1996; Davis, 2003).

Asitlik ölçümlerine benzer şekilde, FTIR ve Raman spektroskopik teknikleri kullanılarak bazik bölgelerin tespit edilmesinde de prob moleküllerinin yardımına ihtiyaç duyulur. Ancak, bazik bölge ölçümü için uygun çok fazla prob molekülü bulunmamaktadır. Yaygın olarak kullanılan prob molekülleri olarak; CO_2 (Tsuji vd., 2003; Jacobs vd., 1973; Jacobs vd., 1973; Yagi vd, 1997), pirol (Lavalley, 1996; Huang ve Kaliaguine, 1992) ve kloroform (Gordymova ve Davydov, 1983; Murphy vd.,1996; Uvarova vd., 1995) gibi maddeler kullanılmış olsa da, bunların bozunma ve bazik bölgelerle reaksiyona girme gibi dezavantajları vardır. Genellikle prob molekülü olarak pirol, çeşitli zeolitlerin baziklik eğilimini göstermek için kullanılmıştır (Barthomeuf, 1991; Xie vd., 1994).

CO_2 bir prob molekülü olarak kullanılarak yapılan IR çalışmaları: Metal oksitler üzerinde genellikle iki tür bazik bölge vardır, bazik hidroksil grupları ve bazik yüzey oksijeni (normalde Lewis bazı olarak adlandırılır). Bu iki tür bazik bölge üzerinde CO_2 adsorpsiyonu, bikarbonat (OH grupları ile) ve çeşitli karbonat türleri (yüzey O ile) ile sonuçlanabilir. Bu türler karakteristik IR titreşim modları ile ayırt edilebilir (Binet vd., 1999; Li vd., 1989) CO_2 adsorpsiyonunun IR spektroskopisi, bazik alanların türünü araştırmak için zeolit katalizörler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Katalizörler üzerine oda sıcaklığında 1 ve 10 dakika boyunca CO_2 adsorpsiyonundan elde edilen IR spektrumları yardımıyla incelenmiştir. İlk CO_2 adsorpsiyonunun ardından, 1800-800 cm^{-1} aralığında IR özellikleri ile çeşitli yüzey türleri kolayca oluşur. Bu IR özellikleri CO_2 adsorpsiyon süresinin, yani yüzey kaplamasının bir fonksiyonu olarak gelişir. Genel olarak, zeolit kristalleri ve küpleri üzerindeki IR bantları, benzer yüzey türlerine işaret edecek şekilde birbirlerine benzer frekanstadır. Bu IR bantlarının çoğu, diğer iki yüzeyde neredeyse hiç gözlenmeyen ilk adsorpsiyondan başlayarak 1292 cm^{-1}'de belirgin bir IR bandı veren zeolit oktahedralleri üzerinde de gözlenmektedir. CO_2 adsorpsiyonu için, 1800-800 cm^{-1} bölgesindeki IR bantlarının varlığı, zeolit üzerinde CO adsorpsiyonuna ilişkin önceki IR çalışmalarına dayanmaktadır (Binet vd., 1999; Wu vd., 2012; Li vd., 1989; Vayssilov vd., 2011). Genel olarak, CO_2'nun bazik OH grupları ile reaktif adsorpsiyonu bikarbonata (3617, 1609, 1402 ve 1215 cm^{-1}) ve bazik yüzey kafes oksijeni ile reaktif adsorpsiyonu çift bağlı (1580, 1292 ve 1025 cm^{-1}), tek bağlı (1580, 1402 ve 1025 cm^{-1}) ve köprülü (1675, 1292 ve 1025 cm^{-1}) karbonatlara yol açar. Genel yüzey karbonat türü, katalizörlerin yüzey yapısına göre değişmese de, aynı tür karbonat türünün, muhtemelen katalizörlerin yüzeyindeki farklı atomik düzenlemeler nedeniyle, katalizörlerin yüzey yapısına bağlı olarak biraz farklı titreşim frekansları

gösterebilmesi dikkat çekicidir. CO_2 adsorpsiyonu ile ilgili önceki yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) çalışmaları, karbonat türünün katalizör yüzey yapısı ile değiştiğini öngörmüştür (Cheng vd., 2013; Hahn vd., 2013). Bu durum, burada deneysel olarak gözlemlenenden farklıdır ve farklılık, hasarlı bölgelerin, yüzey hidroksillerinin ve yüzey yeniden yapılandırmasının varlığına atfedilebilir (Lin vd., 2014; Wu vd., 2010).

CO bir prob molekülü olarak kullanılarak IR çalışmaları: Karbon monoksit, zeolitteki asit bölgeleriyle reaksiyona girdiğinde zayıf bir baz gibi davranır. Zeolitlerde karbon monoksit ve hidroksil grupları arasında hidrojen bağları oluşur ve bu H-bağı etkileşimleri O-H ve C≡O gerilme bölgelerinde IR spektroskopisi ile gözlemlenebilir (Li vd., 1989). Örneğin, köprü oluşturan Bronsted asit bölgelerindeki hidroksil bandı değişime uğrar ve spektrumda kayma gösterir. Kayma, absorpsiyon bandının daha kısa dalga sayısına değişmesidir. Kayma derecesi asit bölgelerinin gücüne bağlıdır ve çalışılan zeolitlerde 296-324 cm^{-1} dalga sayısı kaymasının olduğunu göstermiştir. Değişim ne kadar güçlüyse; asit gücü de o kadar güçlüdür. Eş zamanlı olarak, C≡O, köprüleme Bronsted asit bölgeleri ile hidrojen bağlanması üzerine gaz fazı CO'nun dalga sayısına göre (2143 cm^{-1}) daha uzun dalga sayısına kayma, dalga sayısında değişim gösterir (Wang vd., 2013; Li vd., 1989; Lamberti, vd., 2010) Benzer eğilimler, CO silanollerinin hidroksil grubu ile hidrojen bağı oluşturduğunda, sadece daha zayıf değişimde gözlenir.

H-IM-5 zeoliti üzerinde CO adsorpsiyon deneyi örneğinde; silanol gruplarının O-H gerilmesi ~3748 cm^{-1}'de ve köprü Brønsted asit bölgelerininki ~3615 cm^{-1}'de görünür. CO molekülleri asit bölgelerine adsorbe edildiğinde, silanollerin hidroksil grubu ve Bronsted asit bölgeleri sırasıyla ~3652 cm^{-1} ve ~3302 cm^{-1} 'ye değişmiş olur. Fiziksel olarak adsorbe edilen CO ~2140 cm^{-1}'de bant gösterir. Bu tür, fiziksel olarak adsorbe edilmiş CO'nun yanı sıra liquid-like (sıvı benzeri) CO olarak da adlandırılır. Zeolite hidrojenle bağlanan CO, ~2175 cm^{-1} 'de gerilme gösterir ve gaz fazındaki CO ile karşılaştırıldığında ~3200 cm^{-1} kaymıştır.

Literatürde, zeolit numuneleri üzerinde CO adsorpsiyon deneylerinden gözlemlenenler hakkında tartışılmıştır. Bunun nedenini açıklamak için öncelikle CO'in zeolitlerde asit bölgeleri ile etkileşime girdiğinde oksijen atomu değil hidroksil grupları ile hidrojen bağı oluşturan karbon atomu olduğuna dikkat edilmelidir. Neyman ve arkadaşları (2011) bu konuyla ilgili hesaplamalar yapmışlardır (Neyman vd., 2011).

Karbon monoksitin bağlanma enerjisinin hesaplanan değerinin, oksijen yerine OH üzerinde köprülemesinin adsorpsiyonunda, O-H---O≡C bağ uzunluğu 2,182 A^o olan, 0,06 eV bağlanma enerjisi verdiğini, karbon hariç durumunun ise; OH---CO bağ uzunluğu 2,057 A^o olan 0,19 eV bağlanma enerjisi verdiğini bildirmişlerdir. Bu, moleküler orbital (MO) teorisi kulla-

nılarak açıklanabilir. Moleküler orbital teorisine göre; karbon monoksitin 2p düzeyinde, oksijenin bağlanmaya 4 elektron katkıda bulunduğu, karbonun ise yalnızca 2 elektron katkıda bulunduğu görülebilir. Bu seviyedeki bağlanma orbitallerinden biri sadece oksijenden gelen elektronlardan oluşur, bu da oksijen ile karbon arasında karbona δ yükü veren dativ bağ (dative bond) kovalent bağ oluşturur. Bu bağ orbitali σ_{2p} orbitalidir, En Yüksek Dolu Moleküler Orbitaldir (HOMO). HOMO orbitali ve σ_{2p} orbitalindeki en yüksek enerjili elektron çiftinin karbon üzerinde yoğunlaştığı görülebilir (Cheng vd., 2013).

Hidroksil açısından bakıldığında, prob molekülü ile etkileşim asit-baz reaksiyonudur. Eğer prob molekülü piridin gibi güçlü bir baz olsaydı, proton piridin'e aktarılır ve piridinyum iyonu oluştururdu. Ancak, karbon monoksit zayıf bir bazdır, bu nedenle sadece hidrojen bağı oluşur. Hidrojen bağı üzerine, hidroksil grubundaki oksijen ve hidrojen arasındaki bağ uzunluğu, bağ kuvveti zayıfladıkça uzar. Bu, kuvvet sabitinin (k_f) azalması anlamına gelir ve absorpsiyon bandının daha düşük bir dalga sayısında görünmesini sağlar.

Ancak karbon monoksit için durum farklıdır. Hidroksil grubu ile hidrojen bağı oluşturduktan sonra kayma gösterir. Bunu açıklamak için karbon monoksitin toplam dipol momenti değerlendirilmelidir. Sınır orbitallerinin şeklinin yük dağılımının topografyası ile uyuşmadığı durumların olduğu unutulmamalıdır (Hahn vd., 2013). HOMO, karbon atomundaki ağır yük konsantrasyonunu gösterir.

Güçlü bir şekilde polarize olmuş bir oksijen atomu görülebilir ve bu, karbon monoksitin hidroksil grubuyla hidrojen bağı kurduğunda neden kayma yaşadığını açıklamaktadır. Hidroksil grubundaki pozitif yüklü hidrojen, hidrojen bağı üzerine CO'dan elektron çeker, O-H---C≡O, bu da CO'da daha az polarizasyona yol açar (Senanayake ve Mullins, 2008), böylece molekülün kovalentliği ve kuvvet sabitinin (k_f) değeri artar (Staudt vd., 2011). CO molekülünün kutuplaşmasına neden olan pozitif bir yükün yarattığı elektrik alanı olduğu için (Lamberti vd., 2010), elektrostatik etki olarak adlandırılır (Lamberti vd., 2010, Hahn vd., 2013; Senanayake ve Mullins, 2008; Staudt vd., 2011; Albrecht vd., 2014). C≡O bağında kuvvet sabitindeki artış, absorpsiyon bandının daha yüksek dalga sayısına kaymasına neden olur.

Prob molekülü olarak CO kullanılarak yapılan FTIR ölçümü, Civa Kadmiyum Tellür (MCT) (Mercury Cadmium Telluride) dedektörlü ve KBr Işın Bölücülü Kızılötesi Spektroskopi (IR) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Altın kaplamayla desteklenen ince levha, KBr pencereli kuvars iletim hücresine yerleştirilmiştir. Numune aktivasyonu numunenin 150°C'de 1 saat, 300°C'de 1 saat ve 450°C'de 1 saat vakum altında ısıtılmasıyla yapılmıştır. Aktivasyondan sonra hücre ve numune tekrar oda sıcaklığına soğutuldu. Hattın içine yaklaşık 50mbar karbon monoksit dolduruldu ve hücre daha sonra hatta açıldı. Hat ile hücre arasında dengeye ulaşıldığında hücre tekrar kapatılmış

ve karbon monoksitin zeolit üzerine adsorpsiyonu için sıvı azot kullanılarak hücrenin sıcaklığı -196°C'ye ayarlanmıştır. Spektrum değişiminin gözlenmediği noktaya ulaşıldıktan sonra desorpsiyon işlemine geçilmiştir.

Prob molekülü olarak Piridin kullanılarak yapılan IR çalışmaları: Kızılötesi, katıların asitliğini anlamak için de çok güçlü bir tekniktir. Bantların konumları, ilgili adsorpsiyon bölgelerinin tipik özellikleridir. Piridinin Bronsted asit bölgeleri ile reaksiyonu sonucu oluşan piridinyum iyonu (PyH^+) 1545 (*v19b*) ve 1638 cm^{-1} (*v8a*) civarında bantlar gösterir. Lewis asit bölgelerine koordinatif olarak bağlı piridin 1445 (*v19b*) ve 1610 cm^{-1} (*v8a*) civarında bantlar gösterir. Fiziksel olarak absorbe edilmiş veya hidrojen bağlı piridin, 1440 (*v19b*) ve 1597 cm^{-1} (*v8a*) civarında bantlar gösterir. 1490 cm^{-1} civarındaki bant PyH^+ ve koordinatif bağlı piridinden kaynaklanan titreşimler için ortaktır.

1450 cm^{-1} 'deki bir bant Lewis asit bölgelerine adsorbe edilmiş piridinin titreşim moduna veya katyonlara koordineli olarak bağlanmış piridinin titreşim moduna atfedilmiştir. Bu bant Lewis asit bölgeleri hakkında bilgi verir. 1540 cm^{-1}'deki bir bant Bronsted asit bölgeleri nedeniyle oluşan piridinyum iyonlarından kaynaklanmaktadır. Son olarak, 1490 cm^{-1}'deki bir bant hem Lewis hem de Bronsted asit bölgelerine atfedilir. Bu nedenle, Bronsted ve Lewis asit bölgeleri üzerinde adsorbe edilen piridin miktarının bir ölçüsü olarak 1540 ve 1450 cm^{-1} 'deki bantların birleşik yoğunlukları kullanılarak, bu iki tür asit bölgesinin bağıl konsantrasyonları hakkında değerli bilgiler elde edilebilir (Masukawa, 1997).

Genel olarak kabul edilen bir eğilim (Knöuzinger, 1976), amonyakla karşılaştırıldığında, adsorbe edilmiş piridin bantlarının nispeten keskin ve iyi ayrılmış olduğu ve SiO_2 ve zeolitlerin absorpsiyonuyla örtüşmediği yönündedir. Bu, piridinin çeşitli oksitlerin asit türlerinin (Lewis veya Bronsted) belirlenmesi için daha uygun bir prob molekülü olduğu anlamına gelmektedir. Daha sonra tartışılacağı üzere, bu özellikler Lewis ve Bronsted asit bölgeleri için adsorbe edilmiş piridinin toplam molar tükenme katsayılarının ölçülmesiyle her bir asit bölgesinin sayısını belirlemeye olanak sağlayacaktır.

Bir prob molekülü olarak CO ile yapılan IR deneyinden elde edilen temel bilgi kalitatif asit gücü iken, bir prob molekülü olarak piridin ile yapılan IR deneyinin temel amacı, asit bölgelerinin konsantrasyonu hakkında kantitatif bilgi elde etmektir.

Zeolitlerde piridin adsorpsiyonunda piridin, güçlü bir baz olarak zeolitteki asit bölgeleriyle (Silanol, –AlOHSi–Bronsted asit bölgesi ve Lewis asit bölgesi) etkileşime girer. Örneğin, piridin'in H-Beta zeoliti üzerine adsorpsiyonu ile spektrum nasıl değişir. Az miktarda silanol (~3736 cm^{-1}) ve köprü oluşturan Bronsted asit bölgelerinin tamamının (~3588 cm^{-1}) ortadan kalktığı, 3300-2400 cm^{-1} ve 1700-1400 cm^{-1}'de yeni piklerin ortaya çıktığı görül-

mektedir. 3300-2400 cm^{-1} bölgesinde ise piridin kaynaklı türlerin 8a, 8b, 19a ve 19b modlarının oluşmasıyla, ν(CH) ve δ(NH) karakterli bantlar ortaya çıkmaktadır (Buzzoni vd.,1996). 8a, 8b, 19a ve 19b piridinin titreşim modları içindir ve Wilson'un benzen için olan notlarından uyarlanmıştır (Wilson vd., 1980). Bu modlar piridin içindir.

Piridin silanol ile etkileşime girdiğinde hidrojen bağları oluşur. Hidrojen bağlı piridin ~1597, 1581, 1481 ve 1444 cm^{-1} dalga sayılarında bantlar oluşturur (8a, 8b, 19a ve 19b modları). Bu yeni bantlar silanol bandının azalmasına eşlik etmektedir (Buzzoni vd., 1996). Piridin –AlOHSi– Bronsted asit bölgesine adsorbe edildiğinde, piridin bölge tarafından protonlanır ve piridinyum iyonuna dönüşür. Bu tür, 8a, 8b, 19a ve 19b modları ~1634, 1623, 1491 ve 1544 cm^{-1}, IR spektroskopisi bantları ile gözlenmiştir (Emeis, 1993; Buzzoni vd., 1996). Eş zamanlı olarak –AlOHSi– Bronsted asit bölgelerinin bandı da azalır. Lewis asit bölgeleri üzerinde piridin adsorpsiyonu durumunda ~1622, 1578, 1492 ve 1455 cm^{-1} bantları, (8a, 8b, 19a ve 19b modları) ortaya çıkar (Emeis, 1993; Busca, 2010; Schildknecht-Zanier, 2003).

IR spektrumlarındaki tüm bu bantlar arasında, geleneksel olarak asit bölgelerinin ölçümü iki bant kullanılarak yapılmıştır: ~1544 cm^{-1} (köprü Brønsted asit bölgelerine adsorbe olan piridinyum iyonu, 19b modu) ve ~1455 cm^{-1} (Lewis asit bölgelerine adsorbe olan piridin, 19b modu). Bu bantlar için literatürde çok sayıda molar tükenme katsayısı mevcuttur (Emeis, 1993; Datka vd., 1992; Boscoboinik vd., 2013; Busca, 2010; Schildknecht-Zanier, 2003). En belirgin bandın ~1490 cm^{-1}'de neden miktar belirleme için kullanılmadığı merak edilebilir. Bunun nedeni, bu bandın tek bir türe değil, ~1544 ve ~1455 cm^{-1}'deki bantlara yol açan türlerin kombinasyonuna atanmış olmasıdır. Buradan itibaren, asit bölgesi yoğunluğunun ölçülmesiyle doğrudan ilgili olan ~1544 ve ~1455 cm^{-1} piklerine odaklanılacak ve bantların geri kalanı ayrıntılı olarak tartışılmayacaktır.

Daha önce bahsedilen Lambert-Beer yasasından, absorbansın molar tükenme katsayısı, ışığın içinden geçtiği numunenin konsantrasyonu ve ışığın malzemeden geçtiği mesafe olan yol uzunluğu ile orantılı olduğunu biliyoruz. Bu ilişki denklemle ifade edilebilir.

$$A = abc$$

Burada A=absorbans, $\log_{10}(I_0 / I)$, I_0 ve I gelen ve iletilen radyasyonun yoğunluklarıdır,

a= molar tükenme katsayısı ($dm^3/(mol\text{-}cm)$), b=yol uzunluğu (cm) ve c= türlerin konsantrasyonu (mol/dm^3) dur (Emeis, 1993).

Bronsted ve Lewis asitlikleri arasındaki ayrım, adsorbe edilmiş piridinin FTIR değerleri kullanılarak yapılmıştır. FTIR çalışmaları yapılırken su ve diğer safsızlıkların numuneden uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu hedeflere

ulaşmak ve piridin adsorpsiyonu için çok önemli olan vakum altında çalışmayı kolaylaştırmak için özel bir IR hücresi üretildi. Ön işlem amacıyla nispeten yüksek sıcaklıklar kullanıldığından, hücre Pyrex'ten imal edilmiştir. Numune tutucu, hareketini dışarıdan bir mıknatısla kontrol etmek için demirden yapılmıştır. Hücre, vakum ve piridin adsorpsiyonunu kontrol etmek için 3 yollu bir musluk içermektedir. Hücrede ayrıca IR ışınlarının geçişine izin verecek şekilde birbirinin önünde iki KBr penceresi bulunur. Uygulandığı şekliyle adsorbe edilmiş piridinin FTIR spektroskopisi prosedürü, belirli miktarda zeolit numunesi 500°C'de 4 saat boyunca kalsine edilmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra, numunenin hücre içinde yüksek vakum altında 20 dakika boyunca piridin adsorbe etmesine izin verilmiştir. Örnek 250°C'de 3 saat süreyle ısıtılarak piridinin fiziksel olarak adsorbe edilmesi sağlanmıştır. Daha sonra FTIR spektrumu alınmıştır. Pelet, ~12.000 lb/in^2 (psi) basınç veren bir sıkıştırma ile basılmıştır. KBr tuzu içindeki numunenin yüzdesi %2-5' tir.

Prob molekülü olarak piridin kullanılarak yapılan FTIR ölçümü, döteryum triglisin sülfat (DTGS) (Deuterated L-Alanine doped Triglycene Sulphate) dedektörü ve KBr Işın Bölücü ile birlikte kullanılan Kızılötesi Spektroskopi (IR) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kendinden destekli ince levha, KBr Pencereli yüksek sıcaklık hücresine monte edilmiştir.

Numune sentetik hava ile 450°C'ye ısıtılarak aktive edilmiş ve bu sıcaklıkta 30 dakika tutulmuştur. IR spektrumları gözlemlenerek tüm numunelerin aktive edildiğinden emin olunmuştur. Aktivasyondan sonra numune 150°C'ye kadar soğutuldu. Piridin, spektrumlarda fark edilebilir bir değişiklik olmayana kadar taşıyıcı gaz olarak azot kullanılarak verildi. Piridin ekleme süresi numuneden numuneye farklılık göstermiştir. Piridin zeolitlere eklendikten sonra, spektrumda önemli bir değişiklik olmayana kadar sistem sürekli azot akışıyla süpürüldü. Daha sonra sıcaklık 200°C'ye yükseltildi ve stabilize edildi. 10 dakikalık aralıklarla iki spektrum kaydedildi. Kaydedilen spektrumlar aynıysa, sıcaklık 50°C artırıldı. Aynı işlemler 400°C'ye kadar tekrarlandı (Yurdakoç vd., 1999; Seddigi, 2001).

4. SONUÇLAR

Çok çeşitli metal oksitlerin asit/baz özellikleri (tür, kuvvet, sayı) IR ile çeşitli prob molekülleri ile incelenmiştir: amonyak, piridin, CD_3CN, CO_2, $CHCl_3$, benzaldehit ve nitrobenzen ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir: (1) Asitlik karakterizasyonu için, CD_3CN asit bölgelerinin gücü için ve piridin asit bölgelerinin türü ve sayısı için uygun bir prob molekülüdür. (2) Baziklik karakterizasyonu için, $CHCl_3$ bazik bölgelerin gücü ve nitrobenzen bazik bölgelerin sayısı için uygun bir prob molekülüdür. Yüzey bazik bölgesinin miktarının belirlenmesinde nitrobenzen adsorpsiyonunun uygulanması doğrulanmıştır. (3) Çeşitli metal oksitler için tahmin edilen asidik bölgeler için pi-

ridin ve bazik bölgeler için nitrobenzenin toplam molar tükenme katsayıları, ortalama değerin ±% 10'u içindeydi, bu da tükenme katsayısının asit ve baz bölgelerinin yapısından ve gücünden bağımsız olduğunu gösterir. Bundan sonra, tahmin edilen tükenme katsayıları çeşitli oksit numunelerindeki asit/baz bölgelerinin sayısını belirlemede faydalı olmuştur. Kapsamlı IR sonuçları, çok çeşitli metal oksitlerin asit/baz özellikleri için uygun bir kimyasal indeks sağlamıştır ve basit bir IR deneyi ile metal oksitler üzerindeki Lewis/Bronsted asit bölgelerini ve bazik bölgeleri karakterize etmek için kullanılabilecek ve yeni katalizörler sentezlemek için güçlü bir araç sağlayacaktır.

Zeolitlerin şeklini kontrol etme yeteneği, yüzey yapısının katalizörlerin redoks özelliğini nasıl etkilediğinin araştırılmasına büyük ilgi uyandırmıştır. Buna karşılık, sınırlı çalışmalar katalizörlerin yüzey yapısal varyasyonunun asit-baz tipi reaksiyonlarda farklı katalitik kimyaya neden olabileceğini göstermesine rağmen, katalizörlerin asit-baz özelliğinin doğrudan karakterizasyonu rapor edilmemiştir. IR spektroskopisi sonuçları, yüzey morfolojisinin katalizörlerin asit-baz özelliğini, özellikle de baz özelliğini etkileyebileceğini açıkça göstermektedir. Asit bölgelerinin doğası, türü ve gücü, zeolitlerin şeklinden bağımsız görünmektedir, yani kristaller, küpler ve oktahedralların tümü, güç bakımından önemli bir fark olmaksızın zayıf Lewis asit bölgelerine sahiptir. Bunun tersine, baz bölgelerinin doğası üzerinde belirgin bir yüzey bağımlılığı vardır. İki tür baz bölgesinin varlığıyla, baz bölgelerinin gücü ve miktarı şu sırayı takip eder: kristaller > küpler > oktahedral.

KAYNAKÇA

Albrecht, P. M., Jiang, D. E., Mullins, D. R. (2014), CO2 adsorption as a flat-lying, tridentate carbonate on CeO2 (100), *The Journal of Physical Chemistry C,* 118(17), 9042-9050.

Barthomeuf, D. (1991), (In: Ohlmann G., Pfeifer H., Fricke R. (eds) Catalysis and adsorption by zeolites) Acidity and basicity in zeolites. *In Studies in surface science and catalysis* (Vol. 65, pp. 157-169). Elsevier.

Barthomeuf, D. (1996), Basic zeolites: Characterization and uses in adsorption and catalysis, *Catalysis Reviews Science Engineering*, 38, 521-612.

Binet, C., Daturi, M., Lavalley, J. C. (1999), IR study of polycrystalline ceria properties in oxidised and reduced states, *Catalysis Today*, 50(2), 207-225.

Boscoboinik, J. A., Yu, X., Emmez, E., Yang, B., Shaikhutdinov, S., Fischer, F. D., Sauer J., Freund, H. J. (2013), Interaction of probe molecules with bridging hydroxyls of two-dimensional zeolites: a surface science approach, *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(26), 13547-13556.

Busca, G., (2007), Acid catalysts in industrial hydrocarbon chemistry, *Chemical Reviews*, 107(11), 5366-5410.

Busca, G. (2010), Bases and Basic Materials in Chemical and Environmental Processes, Liquid versus Solid Basicity, *Chemical Reviews,* 110(4), 2217-2249.

Buzzoni, R., Bordiga, S., Ricchiardi, G., Lamberti, C., Zecchina, A., Bellussi, G. (1996), Interaction of pyridine with acidic (H-ZSM5, H-β, H-MORD zeolites) and superacidic (H-Nafion membrane) systems: An IR investigation, *Langmuir,* 12(4), 930-940.

Byrappa, K., Kumar, B. S. (2007), Characterization of zeolites by infrared spectroscopy, *Asian journal of chemistry,* 19(6), 4933-4935.

Cheng, Z., Sherman, B. J., Lo, C. S. (2013), Carbon dioxide activation and dissociation on ceria (110): A density functional theory study, *The Journal of Chemical Physics*, 138(1), 014702.

Chittur, K. K. (1998), FTIR/ATR for protein adsorption to biomaterial surfaces, *Biomaterials*, 19(4-5), 357-369.

Chizallet, C., Bailly, M. L., Costentin, G., Lauron-Pernot, H., Krafft, J. M., Bazin, P., Saussey, J., Che, M. (2006), Thermodynamic brønsted basicity of clean MgO surfaces determined by their deprotonation ability: Role of Mg^{2+}–O^{2-} pairs, *Catalysis today*, 116(2), 196-205.

Clark, T. E., Deckman, H. W., Cox, D. M., Chance, R. R. (2004), In situ determination of the adsorption characteristics of a zeolite membrane, *Journal of membrane science*, 230(1-2), 91-98.

Corma, A., Iborra, S., Velty, A. (2007), Chemical routes for the transformation of biomass into chemicals, *Chemical reviews*, 107(6), 2411-2502.

Dahlhoff, G., Niederer, J. P., Hoelderich, W. F. (2001), ϵ-Caprolactam: new by-product free synthesis routes, *Catalysis Reviews*, 43(4), 381-441.

Datka, J., Boczar, M., Rymarowicz, P. (1988), Heterogeneity of OH groups in NaH-ZSM-5 zeolite studied by infrared spectroscopy, *Journal of Catalysis*, 114(2), 368-376.

Datka, J., Tutek, A.M., Jehng, J.H., Wachs, I.E. (1992), Acidic properties of supported niobium oxide catalysts: an infrared spectroscopy investigation, *Journal of Catalysis*, 135, 186-199.

Davis, R. J. (2003), New perspectives on basic zeolites as catalysts and catalyst supports, *Journal of Catalysis*, 216(1-2), 396-405.

Edwards, P. P., Anderson, P. A., Thomas, J. M. (1996), Dissolved alkali metals in zeolites, *Accounts of chemical research,* 29(1), 23-29.

Emeis, C. A. (1993), Determination of integrated molar extinction coefficients for infrared absorption bands of pyridine adsorbed on solid acid catalysts, *Journal of catalysis*, 141(2), 347-354.

Escalona Platero, E., Peñarroya Mentruit, M., Morterra, C. (1999), Fourier transform infrared spectroscopy study of CD3CN adsorbed on pure and doped γ-alumina, *Langmuir*, 15(15), 5079-5087.

Fox, J. P., Rooy, V., Bates, S. P. (2004), Simulating the adsorption of linear, branched and cyclic alkanes in silicalite-1 and AlPO4-5, *Microporous and mesoporous materials*, 69(1-2), 9-18.

Gordymova, T. A., Davydov, A. A. (1983), Infrared spectra of chloroform adsorbed on γ-Al2O3 and identification of basic surface sites in oxides, *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 23, 233-238.

Göbel, R., Seitz, R. W., Tomellini, S. A., Krska, R., Kellner, R. (1995), Infrared attenuated total reflection spectroscopic investigations of the diffusion behaviour of chlorinated hydrocarbons into polymer membranes, *Vibrational Spectroscopy*, 8(2), 141-149.

Guisnet, M., Guidotti, M. (2009), Applications in Synthesis of Commodities and Fine Chemicals, *Zeolite Characterization and Catalysis: A Tutorial*, 275-347.

Hahn, K. R., Iannuzzi, M., Seitsonen, A. P., Hutter, J. (2013), Coverage effect of the CO2 adsorption mechanisms on CeO2 (111) by first principles analysis, *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(4), 1701-1711.

Han, L., Niemczyk, T. M., Haaland, D. M., Lopez, G. P. (1999), Enhancing IR detection limits for trace polar organics in aqueous solutions with surface-modified sol-gel-coated ATR sensors, *Applied spectroscopy*, 53(4), 381-389.

Hedlund, J., Öhrman, O., Msimang, V., van Steen, E., Böhringer, W., Sibya, S., Möller, K. (2004), The synthesis and testing of thin film ZSM-5 catalysts, *Chemical engineering science*, 59(13), 2647-2657.

Hölderich, W. F., & Van Bekkum, H. (2001), Zeolites and related materials in organic syntheses. Brönsted and Lewis Catalysis, *In Studies in Surface Science and Ca-*

talysis (Vol. 137, pp. 821-910). Elsevier.

Huang M, Kaliaguine S (1992), Zeolite basicity characterized by pyrrole chemisorption: An infrared study, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 88, 751-758.

Jacobs, P. A., van Cauwelaert, F. H., Vansant, E. F., & Uytterhoeven, J. B. (1973), Surface probing of synthetic faujasites by adsorption of carbon dioxide. Part 1.—Infrared study of carbon dioxide adsorbed on Na-Ca-Y and Na-Mg-Y zeolites, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases,* 69, 1056-1068.

Jacobs, P. A., van Cauwelaert, F. H., & Vansant, E. F. (1973), Surface probing of synthetic faujasites by adsorption of carbon dioxide. Part 2.—Infrared study of carbon dioxide adsorbed on X zeolites exchanged with mono-and bi-valent ions, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 69, 2130-2139.

Jacobs, P. A., Flanigen, E. M., Jansen, J. C., van Bekkum, H. (2001), *Introduction to zeolite science and practice*. Elsevier.

Kale, S. M., Singh, A. P. (2002), Para-selective chlorination of cumene with sulfuryl chloride over zeolite catalysts, *Applied Catalysis A: General*, 228(1-2), 1-13.

Knoezinger, H., & Krietenbrink, H. (1975), Infrared spectroscopic study of the adsorption of nitriles on aluminium oxide. Fermi resonance in coordinated acetonitrile, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases,* 71, 2421-2430.

Knöuzinger, H. (1976), Specific poisoning and characterization of catalytically active oxide surfaces, *Advances in Catalysis*, 25, 184-271.

Knöuzinger, H. (2007), *Handbook of Heterogeneous Catalysis,* 2nd ed., Willey, New-York, pp. 1135-1163.

Lamberti, C., Zecchina, A., Groppo, E., Bordiga, S. (2010), Probing the surfaces of heterogeneous catalysts by in situ IR spectroscopy, *Chemical Society Reviews*, 39(12), 4951-5001.

Lasperas, M., Cambon, H., Brunel, D., Rodriguez, I., Geneste, P. (1996), Cesium oxide encapsulation in faujasite zeolites effect of framework composition on the nature and basicity of intrazeolitic species, *Microporous materials*, 7(2-3), 61-72.

Lavalley J.C., (1996), Infrared spectrometric studies of the surface basicity of metal oxides and zeolites using adsorbed probe molecules, *Catalysis Today*, 27, 377-401.

Lercher, J. A., Gründling, C., Eder-Mirth, G. (1996), Infrared studies of the surface acidity of oxides and zeolites using adsorbed probe molecules, *Catalysis Today*, 27(3-4), 353-376.

Li, C., Sakata, Y., Arai, T., Domen, K., Maruya, K. I., Onishi, T. (1989), Adsorption of carbon monoxide and carbon dioxide on cerium oxide studied by Fourier-transform infrared spectroscopy. Part 2.-Formation of formate species on

partially reduced CeO2 at room temperature, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases,* 85(6), 1451-1461.

Li, C., Sakata, Y., Arai, T., Domen, K., Maruya, K. I., Onishi, T. (1989), Carbon monoxide and carbon dioxide adsorption on cerium oxide studied by Fourier-transform infrared spectroscopy. Part 1. -Formation of carbonate species on dehydroxylated CeO2, at room temperature, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 85(4), 929-943.

Li, J., Talu, O. (1993), Structural effect on molecular simulations of tight-pore systems, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions,* 89(11), 1683-1687.

Lin, Y., Wu, Z., Wen, J., Poeppelmeier, K. R., Marks, L. D. (2014), Imaging the atomic surface structures of CeO2 nanoparticles, *Nano letters*, 14(1), 191-196.

Liu, X., Truitt, R. E., Hodge, G. D. (1998), DRIFTS studies of surface properties of steamed FCC catalysts, *Journal of Catalysis*, 176(1), 52-60.

Lundie, D. T., McInroy, A. R., Marshall, R., Winfield, J. M., Jones, P., Dudman, C. C., Lennon, D. (2005), Improved description of the surface acidity of η-alumina, *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(23), 11592-11601.

Masukawa, T., Komatsu, T., Yashima, T. (1997), Strong acid sites generated in aluminosilicate region of SAPO-5, *Zeolites*, 18(1), 10-17.

Morterra, C., Magnacca, G. (1996), A case study: surface chemistry and surface structure of catalytic aluminas, as studied by vibrational spectroscopy of adsorbed species, *Catalysis Today*, 27(3-4), 497-532.

Murphy, D., Massiani, P., Franck, R., Barthomeuf, D. (1996), Basic site heterogeneity and location in alkali cation exchanged EMT zeolite. An IR study using adsorbed pyrrole, *The Journal of Physical Chemistry*, 100(16), 6731-6738.

Neyman, K. M. (2011), Reassignment of the Vibrational Spectra of Carbonates, Formates, and Related Surface Species on Ceria: A Combined Density Functional and Infrared Spectroscopy Investigation, *The Journal of Physical Chemistry C.,* 115, 23435-23454.

Platero, E. E., Mentruit, M. P., Morterra, C. (1999), Fourier Transform Infrared Spectroscopy Study of CD3CN Adsorbed on Pure and Doped Gamma-Alumina, *Langmuir*, 15, 5079-5087.

Ratnasamy, P., Singh, A. P., Sharma, S. (1996), Halogenation over zeolite catalysts, *Applied Catalysis A: General,* 135(1), 25-55.

Ratnasamy P, Singh AP (2008), In: Sheldon RA, van Bekkum H (eds) Fine chemicals through heterogeneous catalysis. John Wiley & Sons, Wiley, Weinheim, p 133.

Schildknecht-Zanier, N. in: Lynch J. (Ed.) (2003), Physico-chemical analysis of industrial catalysts: a practical guide to characterisation, *Editions Technip*, p. 126.

Seddigi, Z.S. (2001), Nature of the FTIR Band in Acidic Zeolites, *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 73(1), 63-70.

Senanayake, S. D., & Mullins, D. R. (2008), Redox pathways for HCOOH decomposition over CeO2 surfaces, *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(26), 9744-9752.

Song, L., & Rees, L. V. (2000), Adsorption and diffusion of cyclic hydrocarbon in MFI-type zeolites studied by gravimetric and frequency-response techniques, *Microporous and Mesoporous Materials,* 35, 301-314.

Staudt, T., Lykhach, Y., Tsud, N., Skaala, T., Prince, K. C., Matolin, V., Libuda, J. (2011), Electronic structure of magnesia– ceria model catalysts, CO2 adsorption, and CO2 activation: a synchrotron radiation photoelectron spectroscopy study. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(17), 8716-8724.

Sun, M. S., Talu, O., & Shah, D. B. (1996), Adsorption equilibria of C5–C10 normal alkanes in silicalite crystals, *The Journal of Physical Chemistry,* 100(43), 17276-17280.

Süer, M. G., Dardas, Z., Ma, Y. H., Moser, W. R. (1996), Anin SituCIR-FTIR Study of n-Heptane Cracking over a Commercial Y-Type Zeolite under Subcritical and Supercritical Conditions, *Journal of Catalysis,* 162(2), 320-326.

Swift K.A.D., In: Sheldon, R. A., Van Bekkum, H. (Eds.). (2008), *Fine chemicals through heterogeneous catalysis.* John Wiley & Sons, Weinheim, p 242.

Tamura, M., Shimizu, K. I., Satsuma, A. (2012), Comprehensive IR study on acid/base properties of metal oxides, *Applied Catalysis A: General*, 433, 135-145.

Tamura, M.; Tonomura, T.; Shimizu, K.; Satsuma, A. (2012), Transamidation of Amides with Amines Under Solvent-free Conditions Using a CeO_2 Catalyst, *Green Chemistry*, 14(1), 717-724.

Tatsumi T. (2001), In: Sheldon, R. A., Van Bekkum, H. (Eds.). (2008). *Fine chemicals through heterogeneous catalysis.* John Wiley & Sons. Weinheim, p 185.

Tsuji, H., Okamura-Yoshida, A., Shishido, T., Hattori, H. (2003), Dynamic behavior of carbonate species on metal oxide surface: oxygen scrambling between adsorbed carbon dioxide and oxide surface, *Langmuir*, 19, 8793-8800.

Thomas, J. K. (1993), Physical aspects of photochemistry and radiation chemistry of molecules adsorbed on silica, gamma, alumina, zeolites, and clays, *Chemical reviews*, 93(1), 301-320.

Uvarova, E. B., Kustov, L. M., & Kazansky, V. B. (1995), (In: Beyer HK, Karge HG, Kiricsi I et al (eds) Catalysis by microporous materials) Basicity of zeolites: IR-spectroscopic study using adsorbed molecularprobes. *In Studies in Surface Science and Catalysis* (Vol. 94, pp. 254-261). Elsevier.

Vayssilov, G. N., Mihaylov, M., Petkov, P. S., Hadjiivanov, K. I., & Neyman, K. M. (2011), Reassignment of the vibrational spectra of carbonates, formates, and related surface species on ceria: a combined density functional and infrared spectroscopy investigation, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(47), 23435-23454.

Wang, Y., Wang, F., Song, Q., Xin, Q., Xu, S., Xu, J. (2013), Heterogeneous ceria catalyst with water-tolerant Lewis acidic sites for one-pot synthesis of 1, 3-diols

via Prins condensation and hydrolysis reactions., *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1506-1515.

Wilson, E. B., Jr.; Decius, J. C.; Cross, P. C. (1980), Jc decius, and pc cross, molecular vibrations. The Theory of Infrared and Raman Vibrational Spectra. McGraw-Hill, New York, p. 754.

Wolf, U., Leiberich, R., & Seeba, J. (1999), Application of infrared ATR spectroscopy to in situ reaction monitoring, *Catalysis today*, 49(4), 411-418.

Wu, Z., Li, M., Overbury, S. H. (2012), On the structure dependence of CO oxidation over CeO2 nanocrystals with well-defined surface planes, *Journal of Catalysis*, 285(1), 61-73.

Wu, Z., Li, M., Mullins, D. R., & Overbury, S. H. (2012), Probing the surface sites of CeO2 nanocrystals with well-defined surface planes via methanol adsorption and desorption, *Acs Catalysis,* 2(11), 2224-2234.

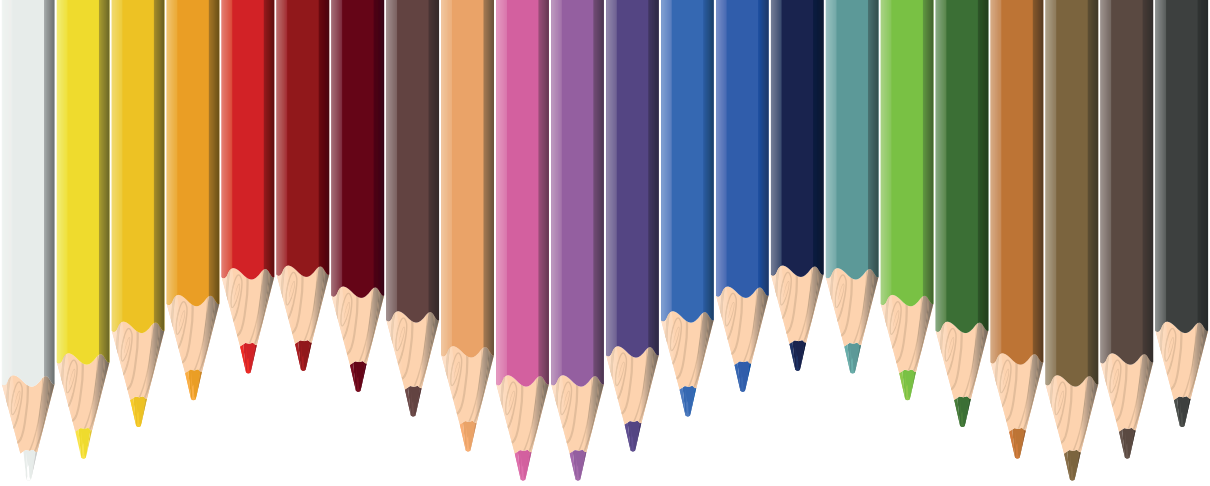
Wu, Z. L.; Li, M. J.; Howe, J.; Meyer, H. M.; Overbury, S. H. (2010), Probing Defect Sites on CeO2 Nanocrystals with Well-Defined Surface Planes by Raman Spectroscopy and O2 Adsorption, *Langmuir,* 26, 16595-16606.

Xie, J., Huang, M., & Kaliaguine, S. (1994), Base and acid sites in alkaline earth cation-exchanged X zeolites, *Catalysis letters*, 29, 281-291.

Yagi, F., Tsuji, H., & Hattori, H. (1997), IR and TPD (temperature-programmed desorption) studies of carbon dioxide on basic site active for 1-butene isomerization on alkali-added zeolite X, *Microporous materials*, 9(5-6), 237-245.

Yang, Y., Rees, L. V. (1997), Adsorption of normal hexane in silicalite-1: an isosteric approach, *Microporous materials,* 12(1-3), 117-122.

Yurdakoç, M., Akçay, M., Tonbul, Y., Yurdakoç, K. (1999), Acidity of Silica Alumina Catalysts By Amine Titration Using Hammett Indicators and FT-IR Study of Pyridine Adsorption, *Turkish Journal of Chemistry*, 23, 319-327.



Bölüm 14

ÜÇ BOYUTLU POLİMERİK DOKU İSKELELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Kürşat KANBUR[1]
İlyas TÜRKMEN[2]
Fatih SARGIN[3]

1 Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6343-2992, kursat.kanbur@cbu.edu.tr
2 Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5424-5412, ilyas.turkmen@cbu.edu.tr
3 Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2683-4543, fatih.sargin@cbu.edu.tr

1. GİRİŞ

Son zamanlarda rejeneratif tıpta dikkatleri üzerine çeken alanlardan birisi doku mühendisliğidir. Doku mühendisliği zarar görmüş veya işlevini yerine getiremeyen doku ya da organların onarımı veya ikamesi olabilecek bir yapının oluşturulması ve implantasyonu ile ilgilenen disiplinler arası bir bilim dalıdır (Song et al., 2015). Doku mühendisliği diğer tedavi yöntemlerine göre daha kolay uyum sağlama, daha az enfeksiyon riski, donör problemini ortadan kaldırma, daha az cerrahi operasyon ve bunlarla birlikte yaşam kalitesinde artış sağlaması açısından üstün özelliklere sahip bir yöntemdir (Amini et al., 2012). Günümüzde doku mühendisliğinde daha çok doku iskelesi tekniği üretimi araştırma alanı olmaktadır (Yang et al., 2006).

Doku iskeleleri hasar bölgesine uygun morfolojik üç boyutlu yapıda, biyouyumlu ve biyoçözünür olması gerekmektedir (Xiaohua Liu & Ma, 2004). Ayrıca doku iskeleleri hücre, besin ve yeterli gaz geçişine izin verecek şekilde gözenekli yapıya sahip olmalıdır (Chocholata et al., 2019). Bu gözenekli yapının içerisinde yeni doku oluşumu sırasında hücrelerin büyümesini üç boyutta desteklemek için por boyutları belli bir genişlikte ve birbirleri ile bağlantılı olmalıdır. Yaklaşık bu por boyutu, yeterli hücre, besin, gaz geçişi ve damarlanmaya izin verebilmesi için 100 ile 400 μm aralığında olması gerekmektedir (Park et al., 2011). Bunun yanında doku iskeleleri bulundukları bölgedeki dokunun mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerine benzer özellikte olmalıdır (Dhandayuthapani et al., 2011).

Doku mühendisliğine en çok ihtiyaç duyulan alanların başında kıkırdak doku gelmektedir. Hasara uğrayan kıkırdak dokuların kendini yenilemesi kısıtlıdır (L. Zhang et al., 2009). Grande D. A. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada hasar gören kıkırdak dokunun tedavisi için doku iskelesi tekniği uygulanarak doku iskelesi tekniğinin etkisi incelenmiştir (Grande et al., 1995). Operasyondan 12 hafta sonra doku iskelesi tekniği uygulanan hasarlı bölgedeki doku iskelesinin çevresindeki dokularla bağ kurduğu gözlemlenmiştir. Fakat kendiliğinden iyileşmeye bırakılan hasarlı kıkırdak doku ise (kontrol grubu) çevre doku ile bağ yapmasını engelleyen ve orijinal eklem kıkırdağı özelliği taşımayan bir fibröz kıkırdak oluşturduğu görülmüştür. Bunun yanında kemik doku hasarında da geleneksel yöntemlerin hastanın yaşam kalitesini olumsuz etkileyebilmesinden dolayı biyomimetik doku iskelesi uygulamalarını öne çıkarmaktadır. Bu gelişme, doku mühendisliğinin günümüzdeki önemini göstermektedir (S. S. Lee et al., 2022). Doku iskelesi malzemesi olarak kolay ve ayarlanabilen bozunma derecesinden dolayı biyouyumlu polimerik doku iskeleleri en çok araştırılan doku iskelesi malzemesidir.

Polimerik doku iskelesi üretiminde poli(L-laktik asit) (PLLA), polivinil alkol (PVA), poliglikolik asit (PGA), poli ε-kaprolakton (PCL) ve poli(-laktik-ko-glikolik asit) (PLGA) gibi sentetik polimerler (Xiaohua Liu & Ma,

2004; Nathan et al., 2023) yanında kolajen, jelatin, kitosan, hiyalüronik asit ve ipek gibi doğal polimerlerden de yararlanılmaktadır (Ebhodaghe, 2021). Polimerik doku iskelesi üretimi için birçok üretim tekniği bulunmaktadır. Bu tekniklerin başlıcaları; gaz-köpük, dondurarak katılaştırma, termal indüklenen faz ayrımı, hızlı-prototipleme, elektroeğirme ve solvent döküm ve partikül liçi teknikleridir. Bu üretim tekniklerinin ortak temel amacı ikame edilecek dokuya uygun boyutta ve hücrelerin büyümesini sağlayacak morfolojide gözenekli ve biyobozunur bir doku iskelesi üretmektir (Ratheesh et al., 2017). Bu özelliklerin yanında ideal doku iskelesinin biyouyumluk, uygun mekanik dayanıma sahip olma ve bozunma esnasında bozunma ürünlerinin toksik etki göstermemesi gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir (Cao et al., 2014; Duarte Campos et al., 2012).

Bu çalışmada üç boyutlu polimerik doku iskelesi üretiminde kullanılan üretim teknikleri araştırılmıştır ve açıklanmıştır. Ayrıca bu tekniklerde yapılan güncel ve önemli çalışmalar aktarılmıştır.

2. ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Üç boyutlu polimerik doku iskeleleri üretiminde birçok yöntem bulunmaktadır. Doku iskelelerinin üretim teknikleri de porozite şekli ve miktarı gibi doku iskelesinin morfolojik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bir doku iskelesinin porozite oranı ve por boyutu biyomedikal uygulamalar sırasında fonksiyonelliği üzerine direk etkisi bulunmaktadır (Mani Diba et al., 2011; Pan et al., 2012). Özellikle açık ve birbirleri ile bağlantılı por ağları, hücrelerin beslenmesi, çoğalması ve hücrelerin yayılarak doku damarlanması ve yeni dokuların üretilmesi için gereklidir. Ayrıca poroz yapı, çevre doku ve doku iskelesi arasında mekanik bir kenetleme yaparak doku iskelesinin stabilitesini kolaylaştırmaktadır (M. Diba et al., 2012). Fakat biyomalzemenin yapısal stabilitesini sürdürebilmesi için bir yandan da yeterli mekanik dayanıma sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden doku iskelesinin mekanik özellikleri ve kütle transferi fonksiyonu arasındaki bir denge sağlanmalıdır. Sonuç olarak doku iskelesinin por boyutu ve porozitesi kullanılacak bölgeye göre belirlenmesi gerekmektedir (Dubey et al., 2015; Govindarajan et al., 2023).

2.1 Termal İndüklenen Faz Ayrımı (TİPA)

Bilindiği üzere, doku mühendisliği uygulamalarında birbirine bağlı bir ağ yapısı şeklinde ve istenilen boyut aralığında oluşturulan poroz yapılar hücre çoğalması ve doku büyümesi için ideal şartların oluşmasını sağlamaktadır. Termal olarak indüklenen faz ayrımı (TİPA), poroz polimerik membranların, ilaç salınım araçlarının ve çeşitli poroz malzemelerin üretilmesinde sıklıkla kullanılan termodinamik bir işlemdir. Bu işlem ile nanometre seviyesinden mikron seviyesine kadar değişen boyutlarda por boyutuna sahip poroz yapıların üretilmesi mümkündür (Subia et al., 2010; Zhu & Che, 2013).

TİPA en basit şekliyle termodinamik tekniklerin kullanılmasıyla bir arada bulunan fazların fiziksel uyumsuzluklarından faydalanarak bu fazları birbirinden ayırma tekniğidir. İdeal şartlarda homojen bir şekilde bulunan polimer solüsyonları belirli sıcaklık aralıklarında termodinamik açıdan kararsız hale gelmekte ve polimer-zengin ve polimer-fakir şeklinde iki ayrı faz oluşturabilmektedir (Gay et al., 2018). Oluşan bu iki fazlı yapıdan, polimerce fakir olan solventin sistemden uzaklaştırılması ile beraber yapıda boşluklar oluşmaktadır. Bu boşlukların oluşması ile birlikte polimer-zengin faz üç boyutlu katı bir iskelet şeklini almakta ve poroz doku iskelesi yapısını oluşturmaktadır (W. J. Li & Tuan, 2009).

Tipik bir TİPA üretiminde ilk aşamada bir polimer ve seyrelticiden oluşan homojen solüsyon elde edilmesi gerekmektedir. Bu karışım, polimerin seyreltici ya da çözücü olarak adlandırılan ve yüksek kaynama noktası - düşük moleküler ağırlığa sahip bir katı ya da sıvı ile eriyik halde karıştırma ya da çözündürme yoluyla elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Sonrasında üretilen bu eriyik karışım ya da çözelti, istenilen şekle göre döküm ya da ekstrüzyon gibi yöntemler kullanılarak nihai şeklini almaktadır. Sistemden termal enerjinin çekilmesi ile birlikte yaşanan sıcaklık düşüşü polimerde faz ayrışması ya da kristalizasyon gibi olayların gerçekleşmesine yol açmaktadır. Son aşamada ise seyreltici dondurarak kurutma gibi yöntemler kullanılarak sistemden uzaklaştırılmakta ve poroz yapı elde edilmektedir (Mironov et al., 2012). TİPA ile yapılan üretimlerde ayrışma mekanizmaları dikkate alındığında, polimer-seyreltici etkileşimine bağlı olarak temel olarak iki mekanizmanın olduğu görülmektedir. Güçlü bir polimer-çözücü etkileşimi olan durumlarda polimer eriyik karışımdan kristalin hale geçerek katı-sıvı faz ayrışması görülmektedir. Polimer-çözücü arasında zayıf bir etkileşimin söz konusu olduğu durumlarda ise, polimer-zengin sıvı matris içinde dağılmış olan polimer-fakir sıvıdan oluşan sıvı-sıvı faz ayrışması görülmektedir (Chiang & Lloyd, 1996). Bu ayrışmanın ayarlanmasında da polimer tipi, polimer konsantrasyonu, çözücü bileşimi, bulanma noktası sıcaklığı, jelleşme noktası sıcaklığı, su verme (soğutma) sıcaklığı ve süresi gibi termodinamik parametreler etkili olmaktadır (Akbarzadeh & Yousefi, 2014; Dhandayuthapani et al., 2011).

Literatürde yapılan birçok farklı çalışmada yukarıda bahsedilen parametrelerin etkisini görmek mümkündür. Kim ve ark. (H. Do Kim et al., 2004) polietilen glikol (PEG) ve poli L-laktik asitten (PLLA) oluşan blok yapısını PLLA-su-dioksan üçlü sistemine ekleyerek TİPA yöntemi ile makro poroz yapıya sahip poli L-laktik asit (PLLA) doku iskeleleri üretmişler ve eklenen PEG miktarının bulanma noktası sıcaklığını yukarı çektiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca farklı sıcaklıklarda yapılan soğutma işlemleri sonucunda daha yüksek soğutma sıcaklıklarında sıvı-sıvı faz ayrımının polimerin düşük viskozitesinden dolayı daha hızlı gerçekleştiği ve düşük sıcaklıklara göre daha

büyük porların elde edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca MC3T3-E1hücreleri ile yapılan hücre kültürü testleri, 150-200 μm por boyutuna sahip doku iskelelerinin hücre çoğalması açısından ideal olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Benzeri şekilde PLLA-dioksan-su üçlü sistemiyle yapılan bir başka çalışmada ise 25°C'de 45 dakika tutularak üretilen doku iskelelerinin 100 μm civarında por çapına sahip olduğu görülürken, 32°C'de 75 dakika tutularak üretilen doku iskelelerinin 200 μm çapında porlara sahip olduğu görülmüştür. 25°C'de polimerin binodal ve spinodal bölgeler arasında olduğu ve bu yüzden de çekirdeklenme sonrası spinodal bozunmanın gerçekleştiği ifade edilmektedir. Ancak 32°C'de 75 dakika tutulan numunenin yarı kararlı bölgede olduğu, çekirdeklenme ve por büyümesi için daha fazla vaktinin olduğu anlaşılmaktadır. Çekirdeklenme mekanizmasında ise, porların büyüklüğü zamana bağlı olarak arttığı için düşük sıcaklıktaki numunede daha küçük porlar elde edilmiştir (Conoscenti et al., 2017).Farklı polimerler kullanılarak yapılan başka bir çalışmada ise Liu ve ark. (S. Liu et al., 2014) tarafından polikaprolakton (PCL)-dioksan-su sistemi ile TİPA yöntemi kullanılarak farklı parametrelerde küresel por yapılarına sahip doku iskeleler üretilmiştir. Buna göre hem artan PCL oranıyla birlikte hem de artan su miktarı ile birlikte bulanma noktası sıcaklığında ve jelleşme noktası sıcaklığında artış görülmüş, ayrıca jelleşme noktasında yapılan yaşlandırma işleminin por çapında artışa yol açtığı tespit edilmiştir.

TİPA yöntemi aynı zamanda birden fazla polimerin bir arada kullanılması ya da birden fazla yöntemin bir arada kullanılması gibi esneklikler sunmaktadır. Poli (laktik ko glikolik asit) (PLGA) ve poliüretan (PU) gibi iki biyouyumlu polimerin harmanlanarak TİPA yöntemiyle üretilen doku iskelelerinin, sadece PLGA yada PU kullanılarak üretilen doku iskelelere göre hem mekanik olarak hem de hücre çoğalması açısından üstünlük gösterdiği yapılan çalışmalar ile ortaya çıkarılmıştır (Rowlands et al., 2007). Daha güncel bir çalışmada ise Szustakiewicz ve ark. (Szustakiewicz et al., 2019) farklı oranlarda PLLA ve hidroksiapatit (HA) karışımından TİPS yöntemi ve tuz liçi kullanılarak doku iskeleler üretmeyi başarmıştır. Buna göre PLLA doku iskelelere en fazla %75 oranında HA ilave edilebileceği, daha yüksek oranlarda kararlı poroz bir yapının elde edilemediği tespit edilmiştir. Ayrıca %75 oranında HA içeren doku iskelelerinin hem mekanik açıdan hem de hücre çoğalması açısından saf PLLA doku iskelelere göre daha üstün olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Farklı polimerler ve katkı malzemeleri ile yapılan bir başka çalışmada ise, ipek fibroin (SF) ve grafen oksit (GO) karışımı kullanılarak TİPA yöntemiyle üretilen doku iskelelerinde %5'e kadar GO kullanılmış ve artan GO oranıyla birlikte doku iskelelerinin kopma dayanımı, Young modülü ve hücre çoğalması gibi özelliklerinde artış görülmüştür. Buna rağmen artan GO oranın çözelti viskozitesini arttırmasından dolayı ortalama por çapını düşürdüğü anlaşılmıştır (S. D. Wang et al., 2018).

Literatürdeki örneklerden de anlaşılabileceği gibi TİPA yöntemi hem farklı polimerlerin ve karışımlarının bir arada kullanılabildiği, hem de farklı üretim yöntemleriyle kombinasyonların yapılabildiği son derece esnek bir yöntemdir. Yapılan çalışmalar, TİPA yönteminde parametre optimizasyonu ile nihai üründe istenilen porozite, por çapı, por şekli, mekanik dayanım ve biyolojik performans gibi sonuçları elde etmenin mümkün olduğunu göstermiştir.

2.2 **Hızlı-Prototipleme (HP) Teknikleri**

Doku mühendisliği uygulamalarında kullanılan doku iskeleleri hücrelerin tutunabileceği, çoğalabileceği ve ekstraselüler matriks yapısını oluşturabileceği yapılar olarak tasarlanmaktadır. Bununla beraber ilaç salınımı, büyüme faktörleri, bimoleküler sinyaller ya da biyogörüntüleme gibi amaçlar için de doku iskeleleri kullanılabilmektedir. Birçok farklı görevin beklendiği bu yapıların tasarımı, kompozisyonu, porozite yapısı ve boyutu klinik olarak başarılı olabilmesi için son derece önemlidir. Doku mühendisliğinde kullanılan doku iskeleleri birçok farklı yöntemle üretilmekte olup, neredeyse bu yöntemlerin tamamı yukarıda belirtilen kriterlerin birini ya da birkaçını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu üretim yöntemleri arasında hızlı prototipleme (HP) yöntemi porozite oranı, boyutu, porozitelerin bir biriyle olan bağlantısı ve doku iskele mimarisi gibi parametrelerin en iyi şekilde kontrol edilebildiği yöntem olarak öne çıkmaktadır (Abdelaal & Darwish, 2011; Subia et al., 2010; Zhu & Che, 2013).

HP yöntemi; serbest biçimli katı üretimi (SFF), eklemeli imalat (AM), masaüstü üretimi, katmanlı üretim ya da aşağıdan yukarı üretim gibi bir çok farklı isimle bilinmekte ve literatürde kendine yer bulmaktadır (Abdelaal & Darwish, 2011). Genellikle HP cihazı ya da sistemi, hammadde haznesi, üretim haznesi, besleme sistemi, hareketli üretim mekanizması ve HP üretim aletinden (nozul vb.) oluşmaktadır. Basitçe HP tekniği ile üretim ilk aşamada bir ürünün endüstriyel standartlaştırılmış formatta, bilgisayar destekli tasarımının (CAD) oluşturulmasıyla başlamaktadır. Bu tasarımın oluşturulmasında bir hastadan elde edilen üç boyutlu (3B) bilgisayarlı tomografi (CT) ya da manyetik rezonans görüntüleme (MRI) verileri kullanılmaktadır. Üretilmesi planlanan parçanın tasarımı yazılım yardımıyla parçalara bölünerek her bir katmanın numerik verileri elde edilmektedir. Daha sonra bu veriler üretimi yapacak olan HP cihazına aktarılmakta ve en alt katmandan başlanarak her bir tabaka 3B'lu bir doku iskelesi oluşturana kadar birbiri üstüne inşa edilmektedir. Bazı uygulamalarda üretim sonrası yüzey temizleme vb. işlemler de yapılmakta olup, ürün kullanıma hazır hale gelmektedir (Abdelaal & Darwish, 2011; C. Wang et al., 2019).

HP yöntemi kendi içerisinde birçok farklı varyasyonu barındırmakta olup, literatürde birçok farklı sınıflandırma ya da gruplandırma yapılmaktadır. Tablo 1'de literatürde en sık rastlanan bazı HP yöntemleri hakkında çeşitli bilgiler verilmiştir.

Tablo 1. *Doku mühendisliği uygulamalarında kullanılan HP teknikleri.*

Yöntem	Üretim Tipi	Malzeme	Avantajlar	Dezavantajlar	Doku Müh. Uygulamaları
Eriyik Biriktirme Modelleme (FDM)	Eks-trüz-yon bazlı bir teknik, katı formda üretim	Çeşitli termoplastik polimerler, seramikler	Düşük maliyet, yeterli mekanik dayanım, kolay ve çok yönlü tasarım, büyük ebatlı üretim imkanı	Yüksek nozul sıcaklığı, yetersiz hammadde çeşitliliği, düşük çözünürlük	Kemik (Rohner et al., 2003) Kafatası (Bourell et al., 2010) Kıkırdak (Woodfield et al., 2009)
Stereolitografi (SL ya da SLA)	Sıvı bazlı üretim	Polimerler	Yeterli mekanik dayanım, destek malzemesi kolayca ayrılabilir, nispe-ten hızlı, ölçeklen-dirme kolay	Reçine kullanımı (toksik etki)	Kemik (Chang et al., 2003) Kalp kapakçığı (Sodian et al., 2002) Omurga (Zhou et al., 2020)
Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	Toz bazlı üretim	Metaller, seramikler, polimerler	Yüksek mekanik dayanım, yüksek hassasiyet, geniş malzeme yelpazesi, destek malzemeye ihtiyaç yok, yüksek verimlilik	Yüksek sıcaklık, bölgesel yüksek enerji girdisi, porozite, üretim sonrası çekme payı	Kemik (Williams et al., 2005) Kıkırdak (C. H. Chen et al., 2011) Kafatası (Mazzoli, 2013)
Seçici Lazer Ergitme	Toz bazlı üretim	Metaller	Yüksek mekanik dayanım, birçok farklı metali üretebilir, nihai ürün kompakt	Yüksek maliyet, yüzey kalitesi, kalıntı gerilimi	Kemik(Warnke et al., 2009) Kalça (Băbțan et al., 2020) Diş(Băbțan et al., 2020)
Elektron Işını Ergitme	Toz bazlı üretim	Metaller	Yüksek mekanik dayanım, düşük kalıntı gerilimi ve çekme payı, düşük oksidasyon, minimal toz kullanımı	Az sayıda metal için uygun, son yüzey çok pürüzlü,	Kemik (X. Li et al., 2010) Kafatası (Parthasarathy et al., 2010)
3B Yazıcı	Toz bazlı üretim	Polimerler, seramikler	Düşük maliyet, yüksek hız, toksik bileşen yok,	Toz formunda malzeme kullanım zorunluluğu, toz partikülleri arasında düşük bağlanma, pürüzlü yüzey, üretim sonrası işlem gerekebilir	Diş İmplantı (Wiria et al., 2010) Kemik (Seitz et al., 2005)

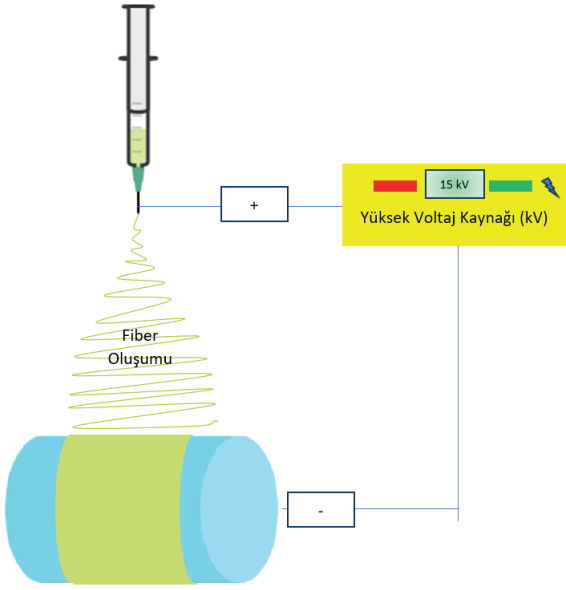
Literatürde yapılan çalışmalar HP yöntemleri ile çok farklı şekillerde ve özelliklerde doku iskelelerinin üretilebileceğini göstermiştir. Long ve ark. (Long et al., 2021) tarafından yapılan çalışmada 3B yazıcı kullanılarak, ameliyat sonrası habis bir kemik tümörü tedavisinde kullanılmak üzere PLGA/Mg kompozit doku iskeleleri üretilmiştir. Yapılan testler sonucunda, Mg ilavesi ile PLGA doku iskelelerinin mekanik dayanımının arttığı ve %10 oranında Mg içeren doku iskelelerinin artık tümör hücrelerinin yok edilmesinde, kemik doku tamiri ve yenilenmesinde mükemmel sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Bir başka çalışmada ise SLM yöntemi kullanılarak 800-1000μm por boyutuna ve 60μm tabaka kalınlığına sahip Ti doku iskeleleri üretilmiştir. Yapılan analizler sonucunda üretilen doku iskelelerinin %74,45 oranında poroziteye sahip olduğu ve bu yöntemle tasarlanan ürün ile üretilen ürün arasında %99,99'luk benzerlik yakalandığı görülmüştür (Yu et al., 2014). Zhou ve ark. (Zhou et al., 2020) tarafından yapılan çalışmada ise SLA tekniği kullanılarak β-TCP omurga diskleri başarıyla üretilmiştir. Üretim sonrası 1050°C'de yapılan sinterleme işlemi ile yapıdaki reçine uzaklaştırılmış ve bulk formda ürünler elde edilmiştir. Yapılan güncel bir çalışmada ise ekstrüzyon bazlı bir FDM kullanılarak 9,5 mm çapında, 2 mm yüksekliğinde PLA doku iskelesi üretimi için 210°C nozul sıcaklığı ve 20 mm/s'lik yazım hızının uygun olduğu ifade edilmiştir (Patil et al., 2023). Oladapo ve ark.(Oladapo et al., 2023) tarafından yapılan çalışmada FDM yöntemi kullanılarak poli-eter-eterketon (PEEK)- kalsiyum HA kompozit kemik implantları üretilmiş ve yapılan testler sonucunda artan HA ilavesi ile mekanik değerlerin de arttığı görülmüştür. Bir başka HP yöntemi olan SLM ile Ti alaşımlarından 0,45-1,1 mm por genişliğine sahip doku iskelesi üretimi gerçekleştirilmiş ve osteoblast hücrelerin ilk aşamada en küçük porlara yerleştiği ve artan süre ile en fazla 0,7 mm genişliğe sahip porlarda tutunma sağladığı gözlemlenmiştir (Warnke et al., 2009).

Yapılan araştırmalar sonucunda HP tekniği ile kompleks şekle ve tasarıma sahip doku iskelelerin birçok farklı malzeme ile üretilebildiği görülmektedir (Q. Zhang et al., 2023). Bu kapsamda üretilecek malzemenin özelliklerine göre uygun HP yönteminin seçilmesi ve optimizasyonu önem kazanmaktadır. Ayrıca HP yöntemi ile kişiye özel ve birebir uygun ebatta doku iskelesi üretilebilmesi mümkün olup, bu özellik HP yöntemini konvansiyonel yöntemlerden daha üst bir noktaya taşımaktadır.

2.3 **Elektroeğirme Tekniği**

Elektroeğirme tekniği, elektrik alanı ile polimerlerden nano veya mikron boyutunda fiber oluşturarak bir hedef üzerinde depolanması ile üretim yapan bir tekniktir ve genel görüntüsü Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu teknikte polimer solüsyonu bir elektriksel alan içine enjekte edilir ve şarj dengesizliği yardımıyla polimer fiberler hedef üzerinde toplanabilir. Bu hedef dönen bir silindir olabileceği gibi aynı zamanda düz bir plaka da olabilmektedir (Subia et al., 2010). Bu proseste şarj dengesizliği kritik bir voltaj uygulanması

ile olmaktadır. Oluşan bu kritik voltaj polimer solüsyonu yüzeyindeki yüzey gerilimini yenerek solüsyon yüzeyinde Taylor konisi şeklini oluşturmaktadır ve elektriksel boşalım jetleri gerçekleşerek elektrik alanla polimerin nano boyutta lif olarak hedef üzerinde toplanmasını sağlanmaktadır. Elektrik alanındaki polimerik jet hedefe varırken bu sırada polimerin içindeki organik solvent buharlaşarak katı şekilde toplanmasını sağlamaktadır. Bu yöntemle elde edilen fiberlerin çapları mikron boyutundan birkaç yüz nanometreye kadar değişmektedir. Bu tekniğin avantajı üretilen doku iskelesinin istenilen boyutta ve gözeneklilik hacminde üretilebilmesidir. Bu tekniğin dezavantajı ise bu teknikle üretilebilecek polimer çeşitliliği sınırlı olmasıdır (Stratton et al., 2016; Zhu & Che, 2013).



Şekil 1. *Elektroeğirme prosesi şematik gösterimi.*

Elektroeğirme prosesinde üretilen fiberin çapı ve morfolojisi üretim parametrelerine oldukça duyarlıdır. Uygun bir nanofiber morfolojisinde, fiberin pürüzsüz bir yapıda olması beklenmektedir. Bundan dolayı uygun viskozite, yüzey gerilimi ve iletkenliğe sahip bir polimer çözeltisi, nanofiberlerin boncuk görünümü olmadan üretilmesi için gereklidir (Jiang et al., 2015). Fakat fiber üretiminde asıl problemli olan durum, işlemin elektroeğirme veya elektrospreyleme olmasıdır ve çözeltinin özelliği bu aşamada önemli rol oynamaktadır. Berry sayısı (Be = [η]c) olarak bilinen polimerin içsel viskozitesi [η] ile polimer konsantrasyonunun (c) çarpımı bir eşik değerinden büyükse, küçük lifler üretilecek ve süreç elektroeğirme olarak adlandırılacaktır. Aksi takdirde polimer jeti damlacıklar halinde parçalanacaktır ve işlem elekt-

rospreyleme olacaktır ve bu durum istenmemektedir (Jaworek et al., 2009). Ayrıca elektroeğirmede, çözeltinin viskozitesindeki artışı fiber çapında bir artışa yol açmaktadır. Çözeltinin yüzey geriliminde veya iletkenliğindeki artış ise, fiber çapında bir azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca üretimdeki voltajın artışı da fiberlerin çapını azaltır; ancak yüksek voltaj, nanoliflerde boncuk oluşumuna yol açacağından istenmemektedir (Pınarbaşı & Cengiz Çallıoğlu, 2022; Utkarsh et al., 2020).

Doku mühendisliği alanında polimerik doku iskele üretiminde elektroeğirme prosesi sıklıkla tercih edilmektedir. Fiberlerin doku iskelesi olarak kullanabilmesi için bu alanda yapılan ilk çalışmalardan birisi Li W. ve arkadaşları (W. Li et al., 2002) tarafından 2002 yılında gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışmada elektroeğirme prosesi ile üretilen nanofiber yapıların doku mühendisliğinde doku iskelesi olarak kullanabileceğini göstermişlerdir. Çalışmada PLGA nanofiberler kullanılmıştır ve elde edilen nanofiberlerin hücrelerin bağlanması ve çoğalması için uygun bir matris olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma sonrasında birçok araştırmacı tarafından PCL (Yoshimoto et al., 2003), PLLA (J. Chen et al., 2006) ve PVA (Mohammadi et al., 2007) gibi polimerlerin de doku iskelesi olarak kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Genel olarak polimerik fiberlerin doku iskelesi olarak uygulamasında, kemik, kıkırdak, tendon, sinir, kas ve deri dokularının yenilenmesi amacıyla çalışmalar bulunmaktadır (Stratton et al., 2016). Kemik doku yenilenmesi ile ilgili çalışmalarda kemiğin doğal matrisi olan kolajen ve HA yapısını kopyalamak için çeşitli sentetik ve doğal polimerler ve genelde hidroksiapatit (HA) kullanılarak elektroeğirme ile doku iskeleleri üretilmiştir ve böylelikle kemik onarımı için yapay bir ECM oluşturulması planlanmıştır. Prabhakaran M. ve arkadaşlarının (Prabhakaran et al., 2009), yapmış olduğu bir çalışmada PLLA polimeri, HA ve kolajen ile kompozit nanofiber üretmişlerdir. Çalışma sonucunda PLLA/kolajen/HA nanofibröz doku iskelesinin, kemik rejenerasyonunu artırarak osteoblastların çoğalması ve mineralizasyonu için potansiyel bir substrat olabileceğini göstermiştir. Zhang Y. ve arkadaşlarının (Y. Zhang et al., 2008) yapmış olduğu bir çalışmada ise kitosan ve HA nanofiber kompozitleri üretilmiştir. Hücre çalışmalarında HA eklenmesinin kemik oluşumunu arttırdığı belirlenmiştir. Bir başka çalışmada ise PLGA polimeri ile HA kompozit nanofiber doku iskeleleri üretilmiştir (Lao et al., 2011). Hücre kültürü çalışmalarında %5'lik HA eklenmesinin hücrelerin yayılmasını arttırdığı belirtilmiştir. Chuenjitkuntaworn B. ve arkadaşları ise PLLA/HA nanofiber kompozitlerini üretmişlerdir. Hücre kültürü testlerinde çözelti hacminin %0,5 miktarınca HA eklenmesi ile osteoblastik ön hücrelerinin bağlanmasını ve çoğalmasını desteklemekle birlikte, osteokalsin mRNA'nın ekspresyonunu ve mineralizasyon derecesini de arttırdığı belirlenmiştir. 2023 yılında ise Canales D. ve arkadaşları (Canales et al., 2023) elektroeğirme metodu ile kalsiyum oksit (CaO) ve poli(laktik asit) (PLA) kompozit nanofiber

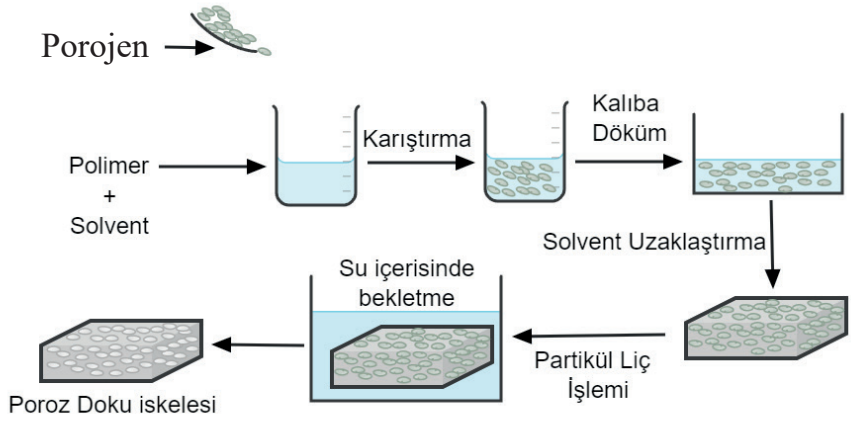
üretmişlerdir. Çalışmada CaO tozunu yumurta kabuğundan elde etmişlerdir ve CaO katkısının elastisite modülünü arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca %20 CaO katkılı PLA nanofiber kompozitlerin yedi günlük hücre kültürü testinde alkalin fosfataz (ALP) ekspresyonunu önemli ölçüde artırarak, osteojenik farklılaşmayı teşvik ettiği görülmüştür. Başka bir çalışmada biyoseramik olarak istiridye kabuğu ile polikaprolakton (PCL)/poliakrilonitril (PAN) nanofiber yapısı, kemik dokusu mühendisliği için üretilmiştir (Esmaeili et al., 2023). Nanofiber yapıya eklenen istiridye kabuğu tozu ile kontrol örnekleriyle karşılaştırıldığında doku iskelesinin biyomineralizasyon yeteneğini ve osteojenik proliferasyonu ve farklılaşmayı geliştirmiştir. Gautam S. ve arkadaşlarının (Gautam et al., 2014) yapmış olduğu bir çalışmada da deri doku mühendisliğinde kullanılabilecek PCL, kitosan ve jelatin içeren kompozit nanofiberler üretmişlerdir. Jelatin ve kitosan doğal polimerlerdir fakat mekanik dayanımı düşük olduğundan desteklemek amacıyla PCL polimeri kullanılmıştır. Bu üçlü kombinasyon yüksek çoğalma hızı, mükemmel hücre yapışması ve doku iskelesi üzerinde karakteristik fibroblast hücre morfolojisi oluşumu deri doku iskelesi için iyi bir aday olabileceği belirtilmiştir. Ardından 2023 yılında Gautam S. ve arkadaşları (Gautam et al., 2023), PCL, jelatin ve kitosan nanofiber malzemeyi belli oranlarda HA içeren karışıma daldırarak yüzey modifikasyonu yapmışlardır. Elde edilen malzemenin yüzey modifikasyonu uygulanmayana göre daha yüksek hücre canlılığı içerdiği görülmüştür ve kemik doku mühendisliği için iyi bir aday olabileceği belirtilmiştir. Kıkırdak doku mühendisliğinde de elektroeğirme ile üretilen doku iskeleleri uygulamaları bulunmaktadır. Kıkırdak, hücre, kolajen, proteoglikan ve su içeren bir ekstraselüler matristen oluşmaktadır. Kolajen tüm dokuyu bir ağ gibi sarmaktadır. Kıkırdakta bulunan hücreler kondrosit hücreleri olarak adlandırılmaktadır ve tüm yapının sadece %1'ini oluşturmaktadır. Kondrosit hücreleri ise ağ moleküllerini yapıp yıkarak sürekli yenilemektedirler (Alpaslan & Korkusuz, 2004; Duarte Campos et al., 2012). Ayrıca hücreler eklem hareketleri sırasında oluşan kuvvetleri ağ moleküllerinin iletimiyle algılamaktadırlar. Hareket sırasında oluşan kuvvetleri algılayan hücreler bir cevap olarak çeşitli hormonlar salgılamaktadırlar ve böylelikle harekete karşı ağ yapısında çeşitli değişikler yapılmasını sağlamaktadırlar. Bir başka ifadeyle kondrositler yüke karşı hassastır ve yük ve hareket ortamında ancak kıkırdağın normal bileşimini sürdürebilmesi mümkün olmaktadır (Duarte Campos et al., 2012). Bu kapsamda kıkırdak doku mühendisliğinde de kıkırdak yapısına benzeyen doku iskelesi üretimi amaçlanmaktadır ve kıkırdak dokusu için yapılan bazı çalışmalar Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. *Kıkırdak doku mühendisliği alanında elektroeğirme prosesi ile yapılan uygulamalar.*

Malzeme	Solvent	Fiber Çapı	Referans
PLA/PCL	Kloroform/Dimetilformamid	400-500 nm	(Thorvaldsson et al., 2008)
Jelatin/PCL	Asetik asit/Tetrafloroetilen	434±130 nm	(Fu et al., 2015)
Jelatin/PLLA	Metilen Klorür/ Dimetilformamid	222±14 nm	(J.-P. Chen & Su, 2011)
PCL/Kolajen/Hyaluronik asit/Trikalsiyum fosfat	Kloroform	6480±1640 nm	(Xudong Liu et al., 2014)
Selüloz/İpek	Trifloroasetik asit/asetik asit	68±17 nm	(Begum et al., 2018)
PLLA/(polietilen glikol (PEG)	Kloroform/Dimetilformamid	1000 nm	(Mirzaei et al., 2017)
PLLA/Çok duvarlı karbon nanotüpler	Diklorometan/ Dimetilformamid	1332-3390 nm	(Holmes et al., 2013)
PLLA/PCL	Kloroform	100-1900 nm	(Shafiee et al., 2014)
PVA/PCL	Kloroform/Dimetilformamid	300-800 nm	(Shafiee et al., 2011)

2.4 **Solvent Döküm ve Partikül Liç Tekniği (SDPL)**

Bu teknik doku mühendisliği için basit ve kullanışlı bir metottur. Bu proseste genellikle porozite oluşturması için porojen adı verilen suda çözünebilen bir tuz ve biyoçözünür bir polimerik malzeme karışımı kullanılmaktadır. Polimerik malzeme bir solvent ile sıvı hale getirildikten sonra içerisine porojen eklenerek bir karışım hazırlanır. Bu karışım bir kalıba dökülerek doku iskelesinin şekillendirilmesi sağlanmış olunur. Daha sonra çözücü uzaklaştırılır ve tuz ile polimer karışımı katılaşarak kalıbın şeklini alır (Abedalwafa et al., 2013; Xiaohua Liu & Ma, 2004). Ardından poroz bir yapı elde etmek için polimer tuz katısı su içerisinde bırakılarak tuzun uzaklaştırılması gerçekleştirilir ve bu prosese liç işlemi denir. Bu işlem sırasında su belli aralıklarla değiştirilerek tuzun yapıdan hızlıca çıkarılması sağlanmış olur ve poroz yapıda polimerik bir doku iskelesi üretimi yapılır (Şekil 2). Bu teknikte porojen olarak kullanılan birçok katkı malzemesi kullanılabilmektedir fakat liç işleminin uygulanması genellikle suyun içine daldırma ile gerçekleştirildiği için suda çözünen malzemeler genellikle porojen olarak kullanılmaktadır. Prosesin avantajları arasında kolay uygulanabilirlik ve por boyutu ve porozitenin kontrolünün kolay sağlanması sayılabilmektedir. Ayrıca bu yöntemle üretilen doku iskelelerinin porozite oranı %93'lere kadar çıkabilmektedir ve por boyutları 500 μm'ye kadar artırılabilmektedir. Bu yöntemin dezavantajları ise üç boyutlu yapılarda polimerin içinde tuz kalıntısı ve porların birbirleri ile bağlantısı sınırlı olmasıdır. Bu teknikle üretilen doku iskelelerinin birbirleriyle bağlantılı porlarının oranı %10-%30 arasında değişmektedir (Xiaohua Liu & Ma, 2004; Zhu & Che, 2013).



Şekil 2. *Solvent döküm ve partikül liç tekniği şematik gösterimi.*

SDPL tekniği ile özellikle kıkırdak dokular için doku iskelesi olarak kullanımında birçok araştırma yapılmıştır. Diba M. ve arkadaşlarının (Mani Diba et al., 2011) bir çalışmasında SDPL tekniği kullanılarak PCl ve forsterit nanotozlarıyla bir nanokompozit doku iskelesi hazırlamışlardır. Yaptıkları bu çalışmada PCl peletleri kloroform içinde hacimce %10 PCl olacak şekilde çözündürmüşlerdir ve belli miktarlarda forsterit nano tozu eklemişlerdir. Porojen malzeme olarak sodyum klorür (NaCl) eklenmiş ve kalıpta solventi uzaklaştırılmıştır. Numuneler kurutulduktan sonra suya daldırılmış ve böylelikle NaCl yapıdan uzaklaştırılarak poroz yapıda bir doku iskelesi elde edilmiştir. Yaptıkları bu çalışmada biyoaktif forsteritin %30 katkı oranına kadar homojen dağıldığı belirlenmiştir ve yaklaşık %92 oranında poroziteli bir doku iskelesi elde edilmiştir. Bir başka çalışmada magnezyum fosfat/PCL nanokompozit doku iskeleleri üretilmiştir (Wu et al., 2012). Yapılan bu çalışmada PCl peletleri diklorometan içinde çözündürülmüş ve belli oranlarda magnezyum fosfat eklenerek karıştırılmıştır. Polimer çözeltisine belli oranda porojen malzeme olarak NaCl eklenmiştir. Solventi uzaklaştırılan numunelerde tuzun yapıdan ayrıştırılması için suda bekletilmiştir. Yapılan bu çalışmada magnezyum fosfatın in vitro degredasyona etkisini iyileştirdiği ve %73 porozite oranında doku iskelesi üretildiği belirtilmiştir. Başka bir çalışmada Reignier J. ve arkadaşları (Reignier & Huneault, 2006) solvent döküm partikül liç işlemi için porojen olarak NaCl'e ek olarak polietilen oksit (PEO) polimeri kullanmışlardır. Bu çalışmada porların birbirleri ile bağlantısını geliştirmek için suda çözünebilen bir polimerik malzeme olan PEO ile suda çözünmeyen PCl belli bir oranda karıştırılmışlardır. Böylelikle daha homojen ve daha yüksek oranda poroziteli bir yapıda doku iskelesi elde edilmeye çalışılmıştır. Literatürde yapılan diğer çalışmalar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Solvent döküm ve partikül liç prosesi ile yapılan çalışmalar.

Malzeme	Solvent	Porojen	Porozite Oranı	Referans
Kitosan/Silisyum dioksit (SiO_2)	Asetik asit	NaCl	%73'e kadar	(Nga et al., 2023)
PLA/PEG	Diklorometan	NaCl	-	(R. Huang et al., 2014)
Polimetil metakrilat (PMMA)/ poliüretan (PU)	Tetrahidrofuran/ Dimetilformamid	NaCl	%82,1 - 93,20	(Sola et al., 2019)
PCL/Grafen	Kloroform	NaCl	%85,07 - 90,10	(H.-Y. Huang et al., 2020)
PLA	Kloroform	NaCl	%89	(Gong et al., 2010)
PCL	Kloroform	PEG+NaCl	%92,56	(Thadavirul et al., 2014)
PU	Tetrahidrofuran/ Dimetilformamid	NaCl	%83-92	(Sin et al., 2010)

2.5 **Dondurarak Kurutma Tekniği**

Günümüzde dondurarak kurutma teknolojileri; ilaç endüstrisi, gıda endüstrisi, malzeme mühendisliği, biyomalzeme mühendisliği, nanoteknoloji gibi birçok alanda kendine giderek daha fazla yer bulmaktadır. Bu yöntem, dondurarak kurutma sırasında su veya organik çözücülerden oluşan çözücünün düşük sıcaklık ve basınçta süblimasyon işlemi ile doğrudan katıdan (buzdan) gaza (buhara) dönüşmesi nedeniyle ısıya duyarlı veya özel bir uygulamaya sahip değerli malzemeler veya ürünler için uygulanabilmektedir. Bu nedenle bu teknikte ilaçlar gibi hassas bileşenler ayrışmamakta veya buharlaşmamaktadır. Buna göre, ısıtma yapılmadığı takdirde nihai ürünler, solvent hariç bileşenlerin tüm özelliklerine sahip olacaktır. Ancak süblimasyon aşaması dondurarak kurutma yönteminin pahalı bir teknoloji olmasına neden olmaktadır (Fereshteh, 2018; Garcia-Amezquita et al., 2015). Dondurarak kurutma tekniği gözenekli iskelelerin üretimi için de kullanılmaktadır (Schoof et al., 2001; Subia et al., 2010). Liyofilizasyon, bu teknik için kullanılan başka bir terimdir (Roseti et al., 2017; Suamte et al., 2023). Dondurarak kurutma tekniği ile ilgili ilk patent kan serumunun dejenerasyonunu önlemek amacıyla 1927 yılında Tival tarafından yayınlanmıştır (Elser et al., 1935; Fereshteh, 2018; Flosdorf, 1945). Bu teknik süblimasyon prensibine dayanmaktadır. Polimer ilk olarak istenen konsantrasyonda bir çözelti oluşturmak için bir çözücü içinde çözülmektedir. Sonrasında çözelti dondurulmakta (katılaştırılmakta) ve yüksek vakum altında liyofilizasyon ile çözücü uzaklaştırılarak yüksek gözeneklilik ve ara bağlantıya sahip iskele elde edilmektedir (Mandal & Kundu, 2009b; Subia et al., 2010). Katılaştırma adımı için gerekli sıcaklık -20 °C ile -80 °C arasında değişmektedir (Roseti et al., 2017). Gözenek boyutu; donma hızı ve pH ile kontrol edilebilmektedir. Yüksek donma hızı değerleri ile daha

küçük gözenekler üretilebilmektedir. Bu tekniğin temel avantajı, yüksek sıcaklık ve ayrı bir liç aşaması gerektirmemesidir. Yüksek sıcaklık, aktiviteyi azaltabilmekte veya iskeleye katılan biyolojik faktörlerin kaybına yol açabilmektedir (Schoof et al., 2001; Subia et al., 2010). Bu tekniğin; gözenek boyutlarındaki düzensizlik (15-35 μm), prosesin uzun olması, yüksek enerji tüketimi ve sitotoksik solvent kullanımı gibi dezavantajları da mevcuttur (Eltom et al., 2019; Suamte et al., 2023).

Bir dondurarak kurutma makinesi tipik olarak bir soğutma sistemi, vakum sistemi, kontrol sistemi, ürün haznesi ve kondansatörden oluşmaktadır. Buna ek olarak dondurarak kurutma prosesi; ön işlem veya formülasyon, dondurma, birincil kurutma ve ikincil kurutma olmak üzere dört işlem adımı içermektedir. İlk adımda, prekürsörlerin prosese hazır olması için işlemden geçirilmesi gerekmektedir. Bu işlem karıştırma, spesifik ajanlarla işlevselleştirme veya diğer yöntemler olabilir, bu da düşük basınca karşı direncin artırılması veya biyolojik ve mekanik özellikler gibi üç boyutlu iskele özelliklerinin geliştirilmesi gibi dondurarak kurutma sürecinde prekürsör stabilitesinin iyileştirilmesiyle sonuçlanmaktadır. Dondurma aşamasında, hazırlanan öncüller özel kalıba veya bir dondurma-kurutma tankına yüklenir ve dondurucuya yerleştirilir. Ardından bunlar sıvı nitrojen, mekanik soğutma veya sulu metanol içinde kuru buz ile soğutulur. Bu aşamanın kilit noktası, çözücünün üçlü noktasının altında bir sıcaklık elde etmektir. Üçlü nokta, kurutma aşamalarında erime yerine süblimleşmenin gerçekleşmesini sağlamak için çözücünün katı, sıvı ve gaz fazlarına aynı anda sahip olabileceği en düşük sıcaklıktır (Fereshteh, 2018; Nail et al., 2002).

Daha büyük kristalin daha kolay süblimleşebileceği literatürde belirtilmektedir. Üç boyutlu yapıyla ilgili olarak, daha büyük ve daha düzgün buz kristalleri elde etmek için periyodik olarak sıcaklığı yükseltip düşürerek dondurma veya tavlama işlemini yavaşça yapmak mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte, büyük buz kristalleri yapıyı bozabilir, bu da düzgün olmayan bir üç boyutlu iskelenin oluşmasına neden olarak özelliklerinin bozulmasına yol açabilir. Bu nedenle, bazı durumlarda çözelti, ötektik noktasından daha düşük sıcaklıklara, genellikle -40 ile -80°C sıcaklıklar arasında hızla dondurulur; bu da büyük kristallerin oluşumunun önlenmesiyle sonuçlanır. Amorf malzemelerde ötektik noktanın bulunmaması nedeniyle dondurma işleminde kritik noktaların dikkate alınması gerekir. Dondurarak kurutma teknolojisinde dondurma işleminin en kritik işlem adımı olduğu bilinmektedir. Üçüncü adım olan birincil kurutmada, donmuş bileşenlerdeki suyun yaklaşık %95'i süblimasyon işlemiyle uzaklaştırılmaktadır. Hızın çok düşük olması nedeniyle sıcaklığın neden olduğu yapısal hasarları önlemek için bu aşama birkaç saatten birkaç güne kadar sürebilmektedir. İkincil kurutma aşamasında, ikinci aşamada donmayan kalan solvent moleküllerinin buharlaşması beklenmektedir. Dondurulmuş malzemenin yüzeyindeki solvent molekülle-

rinin desorpsiyonunu sağlamak için, sıcaklık 0°C'nin üzerine dahi yükseltilebilir ve basınç, önceki adımdakinden daha düşük bir seviyeye düşürülür. Dondurarak kurutma prosesi tamamlandıktan sonra inert bir gaz kullanılarak vakum kırılmaktadır (Fereshteh, 2018; Nail et al., 2002).

İstenilen özelliklere sahip bir iskele üretebilmek için yapının gözenek morfolojisi, gözeneklilik ve bileşen açısından homojen bir dağılıma sahip olması gerekmektedir. Gözeneklerin ve gözenekliliğin morfolojisi iki grup faktöre bağlıdır: ilk grup, birinci adımdaki sıcaklığın düşme hızı, hazne (kalıp/tank) basıncı, her adımın süresi ve küf varlığı/yokluğu gibi faktörlerdir. Bunlar dondurarak kurutma işleminin yardımcı faktörleri olarak ifade edilmektedir. İkinci grup, polimer konsantrasyonu, çözeltinin viskozitesi, çözücü tipi ve polimer dahil olmak üzere çözelti faktörleriyle ilgilidir (Fereshteh, 2018).

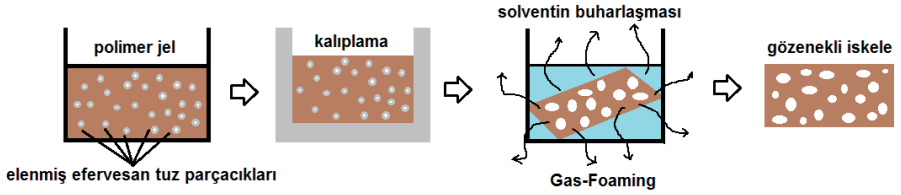
Tablo 4. *Gözenekli iskeleler üretmek için kullanılan dondurarak kurutma tekniğine ilişkin örnek çalışmalar.*

Polimer	Takviye	Solvent	Sıcaklık (°C)	Gözenek Boyutu (mm)
Kolajen	Hidroksiapatit	Asetik Asit/Su	-80	38-59 (Kane & Roeder, 2012)
Kolajen -Glikozaminoglikan	-	Asetik Asit/Su	-40	110 (O'Brien et al., 2004)
Kolajen	Elastin	Asetik Asit/Su	-40	84,8-96,1 (Ryan & O'Brien, 2015)
Kolajen	Nanoselüloz Lifler	Asetik Asit/Su	-18	- (Lu et al., 2014)
Jelatin-Kitosan	Biyocam	Asetik Asit/Su	-20	136-179 (Gentile et al., 2012)
Jelatin	Hidroksiapatit	Su	-20	200-400 (H. W. Kim et al., 2005)
Jelatin	Trikalsiyum Fosfat	Su	-50	165-378 (Panzavolta et al., 2009)
Kitosan	-	Su	-40	5-50 (Cai et al., 2009)
Silk	-	Su	-20	60-110 (Bhardwaj, Chakraborty, et al., 2011)
Silk-Kitosan	-	Asetik Asit/Su	-20	80-116 (Bhardwaj, Nguyen, et al., 2011)
PLLA	-	1,4-dioksan/Su	Sıvı Azot	15-30 (J. W. Kim et al., 2009)
PDLLA	Biyocam	Dimetil Karbonat	Sıvı Azot	10-100 (Maquet et al., 2004)
PCL	-	Diklorometan/Su	Sıvı Azot	20-25 (Baker et al., 2009)
PLGA	Biyocam	Diklorometan/Su	Sıvı Azot	30-50 (Baker et al., 2009)

Bu teknikte, tasarlanmış bir kalıp kullanılarak yönetilebilir gözenek boyutuna, morfolojiye ve yapıya sahip üç boyutlu polimerik ve seramik iskeleler üretilebilmektedir. Bu özellikler, değişen işlem faktörleri ile kontrol edilebilir ve sonuçta farklı dokular için istenen biyolojik, mekanik ve fiziksel özellikler elde edilebilmektedir. Dondurarak kurutma teknolojisi suda çözünür polimer, organik çözünür polimer ve seramik gibi çok çeşitli malzemelere uygulanabilmektedir (Tablo 4). Bu yöntemin en büyük avantajı çözücü/ortam olarak toksik organik madde yerine suyun kullanılmasıdır. Bu özelliği dondurarak kurutma tekniğini daha yüksek biyouyumluluğa sahip iskele üretme kabiliyetine sahip, ekonomik ve çevre dostu bir yöntem haline getirmektedir (Eltom et al., 2019; Roseti et al., 2017; Suamte et al., 2023). Ek olarak bu işlem, iskelelerin özelliklerini geliştirmek amacıyla gaz-köpük, tuz liçi, sıvı dağıtma ve jel döküm gibi diğer yöntemlerle birleştirilebilmektedir (Fereshteh, 2018).

2.6 **Gaz-Köpük Tekniği**

Doku iskeleleri, doku mühendisliğinde insan hücrelerinin ekimi ve tutunması için bir matris olarak kullanılmaktadır (Dehghani & Annabi, 2011). Doku mühendisliği uygulamaları için istenilen özelliklere sahip gözenekli iskelelerin üretiminin karmaşık ve zorlu bir süreç olduğu bilinen bir durumdur. İskele üretim teknikleri için temel gereksinimler arasında makro ve mikro yapıların kontrolü, biyo-uyumluluğun ve mekanik özelliklerin korunması yer almaktadır (Puppi et al., 2010). Gözeneklilik ve gözenek bağlantısı ve ortalama gözenek boyutu da dahil olmak üzere iskelelerin gözenek mimarisi, hücrenin hayatta kalması, çoğalması ve hücre dışı matrislerin salgılanması açısından kritik öneme sahiptir (Lien et al., 2009; Mandal & Kundu, 2009a). Bu gözenekler, oksijen ve besini transfer etmek ve hücrelerden üretilen atıkları uzaklaştırmak için kullanılır (Dehghani & Annabi, 2011). Büyük gözenekler etkili besin temini, gaz difüzyonu ve metabolik atıkların uzaklaştırılması, ancak düşük hücre bağlanması ve hücre içi sinyalizasyona yol açar. Küçük gözenekler ise tam tersi etkilere sahiptir (Oh et al., 2007). Sonuç olarak hem makro gözenekler hem de mikro gözenekler içeren iskelelerin inşası, hücresel büyüme için gerekli fiziksel desteği sağlayabilir (Whang et al., 1999). Gözenekli iskeleler oluşturmak için elektro eğirme, dondurarak kurutma ve solvent dökümü/tuz liçi gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır; ancak bu tekniklerin dezavantajları arasında toksik organik çözücü kullanımı, ince iki boyutlu yapıların oluşumu, homojen olmayan ve sınırlı gözeneklilik, düzensiz şekilli gözenekler ve yetersiz gözenek ara bağlantısı gibi durumlar yer almaktadır (Annabi et al., 2010; Puppi et al., 2010).



Şekil 3. *Gaz-köpük işleminin şematik gösterimi.*

Gaz bazlı teknikler, gözeneklilik üretimi için geleneksel yöntemlerin kullanımıyla ilişkili bazı sorunları elemine etmek için kullanılmaktadır. Gaz köpürtme (gaz-köpük) yöntemi (Şekil 3), bir polimer boyunca dağılmış gaz kabarcıklarının çekirdeklenme ve büyüme olaylarını esas almaktadır (Lips et al., 2005). Gaz-Köpük tekniği; (I) gaz/polimer çözeltisinin oluşturulması ve kimyasal reaksiyon yoluyla gaz kabarcıklarının üretilmesi (II) gaz kabarcığı (gözenek) çekirdeklenmesi (III) gaz kabarcığı büyümesi ve hacim genişlemesi olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır (Barbetta, Barigelli, et al., 2009). Gaz kabarcıkları, kimyasal reaksiyon yoluyla ya da düşük veya yüksek basınçta polimer fazına inert bir gazın eklenmesiyle yerinde üretilebilir (Barbetta, Carrino, et al., 2010). Gözenekli iskeleler üretmek için kullanılan farklı gaz bazlı tekniklerden örnekler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. *Gözenekli iskeleler üretmek için kullanılan farklı gaz bazlı tekniklere ilişkin örnek çalışmalar.*

Üretim Metodu	Kullanılan Polimerler	Gözenek Boyutu (mm)
İnert bir gazın insüflasyonu yoluyla köpüklenme	Jelatin	250-360 (Barbetta, Rizzitelli, et al., 2010)
	Aljinat	206 (Barbetta, Barigelli, et al., 2009)
	Kitosan	250 (Barbetta, Carrino, et al., 2010)
Gaz-Köpük+Seçici Polimer Ekstraksiyonu	PCL	38-312 (A. Salerno et al., 2007, 2009)
Çapraz bağlanma sırasında yüksek basınçlı CO_2 kullanımı	Elastin	79,8 (Annabi et al., 2009)
	Kitosan	32-43,9 (Ji et al., 2011)
	PCL/Elastin	5-540 (Annabi et al., 2011)
Gaz-Köpük/Tuz Liçi	PCL	158-540 (Annabi et al., 2011) 10-90 (Aurelio Salerno et al., 2008)
	PLGA	38,8–323,9 (J. Y. Lee et al., 2007)
	PLA	580,1 (Tai et al., 2007)

CO_2-H_2O emülsiyon şablonlanması	Kitosan, PVA, PVA/ PEG	3-15 (J. Y. Lee et al., 2007)
	Aljinat	23,9-250 (Partap et al., 2006)
Bir gazın in situ üretimi ile köpüklenme	Aljinat	100-300 (Young et al., 2008)
	Jelatin	230 (Barbetta, Gumiero, et al., 2009)
	PLLA	100-300 (Young et al., 2008)

Gaz-Köpük tekniğinde, orta derecede asidik çözeltilerde CO_2 veya N_2 gibi inert bir gaz oluşturmak için polimer fazına bir köpürtücü madde eklenmektedir. Polimerin gözenekli yapısı, süreksiz faz olan dağılmış gaz fazının polimerin sürekli fazından çıkarıldığında oluşmaktadır. Gaz ve sıvı fazın yoğunlukları arasında büyük bir fark olduğundan gaz-köpük tekniği ile üretilen polimerik köpüklerin düşük kinetik kararlılığa sahip olduğu ifade edilmektedir. Sıvı fazın aşağıya doğru akışıyla birlikte gazın yukarı yönlü hareketi bulunmaktadır (Barbetta, Gumiero, et al., 2009; Barbetta, Rizzitelli, et al., 2010). Bu durum gözeneksiz bir alt katmana ve oldukça gözenekli bir üst yüzeye sahip homojen olmayan bir köpük oluşumuna yol açmaktadır. Köpüğü stabilize etmek için polimer çözeltisine kabarcık birleşmesine neden olan sıvı drenajını önlemek üzere genellikle bir yüzey aktif madde eklenmektedir (Barbetta, Barigelli, et al., 2009). Polimerik köpüklerin bozulan homojenliğini birtakım proses parametrelerini değiştirerek en aza indirmek mümkündür. Bunlardan birisi çözelti viskozitesinin artırılmasıdır. Bunun yanında sıcaklığa duyarlı hızlı katılaşan polimer kullanımı ve gaz kabarcıklarının oluşmasından sonra polimerizasyonu tetikleyen bağlayıcı ve başlatıcı eklenmesi olabilir (Gemeinhart et al., 2000).

Geleneksel gaz köpürtme teknikleri ile birbirine bağlı gözeneklere sahip yüksek gözenekli iskeleler üretilebilmektedir. Ancak, iskelelerin oluşturulması için yüzey aktif madde ve yüksek viskoziteli çözelti kullanılması gerekmektedir. Yüzey aktif madde kalıntısı, iskelelerin biyouyumluluğu üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabileceği, toksik olmayan yüzey aktif madde kullanımı, doku mühendisliğinde biyouyumlu iskelelerin üretimi için geleneksel gaz bazlı tekniklerin uygulamalarını genişletebileceği ifade edilmektedir. Geleneksel gaz köpürtme tekniklerinde, yüzey aktif madde ve çözeltinin viskozitesi kontrol edilerek yapının gözenekliliği manipüle edilebilmektedir. Sıcaklık, basınç, vakum oranı ve tuz konsantrasyonu gibi proses parametreleri, gaz köpürtme proseslerinde iskelelerin mikro yapılarını kontrol etmek için kullanılan önemli parametrelerdir. Arzu edilen gaz köpürtme tekniği, yüzey aktif madde ve organik çözücü kullanımını ortadan kaldıran teknik-tir. Bu teknik, spesifik doku mühendisliği uygulaması için uygun gözenekler oluşturma potansiyeline sahiptir. Gaz köpürtme teknikleri, oksijen ve besin

maddelerinin iskelelere kütle transferini artırabilen gözenekli ve kalın kesitli iskelelerin oluşumunu sağlamaktadır (Dehghani & Annabi, 2011).

3. SONUÇ

Hasar almış dokuların yenilenmesi amacıyla yapılan tedavi yöntemleri arasında doku iskeleleri ile geçici bir matris oluşturma tekniği, birçok avantajı ile öne çıkmaktadır. Doku iskelesi malzemesi olarak kullanılan biyouyumlu ve biyobozunur polimerik malzemeler bu alanın ileri gelen malzemeleri arasındadır. Bu kapsamda uygulama alanında gerekli özellikleri karşılamak için polimerik doku iskelesi üretiminde birçok proses geliştirilmiştir. Bu proseslerin her birinin spesifik olarak birçok avantajı bulunmaktadır. Bu yöntemler arasından TİPA yöntemi farklı polimerlerin bir arada kullanılabildiği esnek bir yöntem olduğu görülmüştür. Ayrıca TİPA yönteminde parametre değişimi ile nihai üründe istenilen özellikler kolaylıkla elde edilebilmektedir. Günümüzde giderek kullanımı yaygınlaşan HP tekniği ise kompleks şekle ve tasarıma sahip doku iskelelerini kolaylıkla üretilmesine imkan veren bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. HP yöntemi kişiye özel doku iskelelerin üretilebilmesine olanak sağlaması açısından diğer üretim tekniklerinden pozitif yönde ayrışmaktadır. Elektroeğirme tekniği ise farklı polimerlerin kullanılmasına imkan veren, istenilen gözeneklilik boyutunda ve ağsı yapıda doku özelliklerini karşılayan bir yöntemdir. Buna karşılık SDPL tekniği diğer yöntemlere nazaran daha düşük maliyetli doku iskelesi üretimine olanak sağlamaktadır. Dondurarak kurutma prosesinde istenilen gözenek boyutu ve morfolojisine sahip üç boyutlu polimerik iskeleler üretilebilmekte ve bunun yanında solvent kalıntısı en az seviyeye indirgenerek solvent kaynaklı biyouyumluluk problemlerini ortadan kaldırmaktadır. Gaz köpük yöntemi ise polimer boyunca homojen gözenek dağılımı sağlayabilen bir yöntem olması ile öne çıkmaktadır. Genel olarak doku mühendisliğinde hasar alan dokunun gereksinimlerine göre uygun üretim yöntemi tercih edilmesi gerekmektedir.

REFERANSLAR

Abdelaal, O., & Darwish, S. (2011). Fabrication of Tissue Engineering Scaffolds Using Rapid Prototyping Techniques. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*.

Abedalwafa, M., Wang, F., Wang, L., & Li, C. (2013). Biodegradable poly-epsilon-caprolactone (PCL) for tissue engineering applications : A review. *Reviews on Advanced Materials Science*, *34*(December), 123–140.

Akbarzadeh, R., & Yousefi, A. M. (2014). Effects of processing parameters in thermally induced phase separation technique on porous architecture of scaffolds for bone tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials*, *102*(6), 1304–1315. https://doi.org/10.1002/JBM.B.33101

Alpaslan, Ş., & Korkusuz, F. (2004). Kıkırdak Onarımında Doku Mühendisliği Uygulamaları. *TOTBİD (Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği) Dergisi*, *3*(3–4).

Amini, A. R., Laurencin, C. T., & Nukavarapu, S. P. (2012). Bone Tissue Engineering: Recent Advances and Challenges. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, *40*(5), 363–408. https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.v40.i5.10

Annabi, N., Fathi, A., Mithieux, S. M., Martens, P., Weiss, A. S., & Dehghani, F. (2011). The effect of elastin on chondrocyte adhesion and proliferation on poly (ε-caprolactone)/elastin composites. *Biomaterials*, *32*(6), 1517–1525. https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2010.10.024

Annabi, N., Mithieux, S. M., Boughton, E. A., Ruys, A. J., Weiss, A. S., & Dehghani, F. (2009). Synthesis of highly porous crosslinked elastin hydrogels and their interaction with fibroblasts in vitro. *Biomaterials*, *30*(27), 4550–4557. https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2009.05.014

Annabi, N., Nichol, J. W., Zhong, X., Ji, C., Koshy, S., Khademhosseini, A., & Dehghani, F. (2010). Controlling the porosity and microarchitecture of hydrogels for tissue engineering. *Tissue Engineering. Part B, Reviews*, *16*(4), 371–383. https://doi.org/10.1089/TEN.TEB.2009.0639

Băbțan, A. M., Timuș, D., Soriță̆u, O., Boșca, B. A., Barabas, R., Ionel, A., Petrescu, N. B., Feurdean, C. N., Bordea, I. R., Saraci, G., Vesa, Ș. C., & Ilea, A. (2020). Tissue Integration and Biological Cellular Response of SLM-Manufactured Titanium Scaffolds. *Metals 2020, Vol. 10, Page 1192*, *10*(9), 1192. https://doi.org/10.3390/MET10091192

Baker, S. C., Rohman, G., Southgate, J., & Cameron, N. R. (2009). The relationship between the mechanical properties and cell behaviour on PLGA and PCL scaffolds for bladder tissue engineering. *Biomaterials*, *30*(7), 1321–1328. https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2008.11.033

Barbetta, A., Barigelli, E., & Dentini, M. (2009). Porous alginate hydrogels: Synthetic methods for tailoring the porous texture. *Biomacromolecules*, *10*(8), 2328–2337. https://doi.org/10.1021/BM900517Q/SUPPL_FILE/BM900517Q_SI_001.PDF

Barbetta, A., Carrino, A., Costantini, M., & Dentini, M. (2010). Polysaccharide based scaffolds obtained by freezing the external phase of gas-in-liquid foams. *Soft Matter*, *6*(20), 5213–5224. https://doi.org/10.1039/C0SM00616E

Barbetta, A., Gumiero, A., Pecci, R., Bedini, R., & Dentini, M. (2009). Gas-in-liquid foam templating as a method for the production of highly porous scaffolds. *Biomacromolecules*, *10*(12), 3188–3192. https://doi.org/10.1021/BM901051C/ASSET/IMAGES/MEDIUM/BM-2009-01051C_0002.GIF

Barbetta, A., Rizzitelli, G., Bedini, R., Pecci, R., & Dentini, M. (2010). Porous gelatin hydrogels by gas-in-liquid foam templating. *Soft Matter*, *6*(8), 1785–1792. https://doi.org/10.1039/B920049E

Begum, R., Perriman, A. W., Su, B., Scarpa, F., & Kafienah, W. (2018). Electrospun Cellulose-Silk Composite Nanofibres Direct Mesenchymal Stem Cell Chondrogenesis in the Absence of Biological Stimulation. *BioRxiv*, *434316*, 1–26. https://doi.org/10.1101/434316

Bhardwaj, N., Chakraborty, S., & Kundu, S. C. (2011). Freeze-gelled silk fibroin protein scaffolds for potential applications in soft tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, *49*(3), 260–267. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2011.04.013

Bhardwaj, N., Nguyen, Q. T., Chen, A. C., Kaplan, D. L., Sah, R. L., & Kundu, S. C. (2011). Potential of 3-D tissue constructs engineered from bovine chondrocytes/silk fibroin-chitosan for in vitro cartilage tissue engineering. *Biomaterials*, *32*(25), 5773–5781. https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2011.04.061

Bourell, D., Espalin, D., Arcaute, K., Rodriguez, D., Medina, F., Posner, M., & Wicker, R. (2010). Fused deposition modeling of patientspecific polymethylmethacrylate implants. *Rapid Prototyping Journal*, *16*(3), 164–173. https://doi.org/10.1108/13552541011034825

Cai, Z., Chen, P., Jin, H. J., & Kim, J. (2009). The effect of chitosan content on the crystallinity, thermal stability, and mechanical properties of bacterial cellulose-chitosan composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *223*(10), 2225–2230. https://doi.org/10.1243/09544062JMES1480

Canales, D., Moyano, D., Alvarez, F., Grande-Tovar, C. D., Valencia-Llano, C. H., Peponi, L., Boccaccini, A. R., & Zapata, P. A. (2023). Preparation and characterization of novel poly (lactic acid)/calcium oxide nanocomposites by electrospinning as a potential bone tissue scaffold. *Biomaterials Advances*, *153*(May), 213578. https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213578

Cao, Z., Dou, C., & Dong, S. (2014). Scaffolding Biomaterials for Cartilage Regeneration. *Journal of Nanomaterials*, *2014*, 1–8. https://doi.org/10.1155/2014/489128

Chang, P. S. H., Parker, T. H., Patrick, C. W., & Miller, M. J. (2003). The accuracy of stereolithography in planning craniofacial bone replacement. *The Journal of Craniofacial Surgery*, *14*(2), 512. https://doi.org/10.1097/00001665-200303000-00006

Chen, C. H., Chen, J. P., & Lee, M. Y. (2011). Effects of gelatin modification on rapid prototyping pcl scaffolds for cartilage engineering. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, *11*(5), 993–1002. https://doi.org/10.1142/S0219519411004848

Chen, J.-P., & Su, C.-H. (2011). Surface modification of electrospun PLLA nanofibers by plasma treatment and cationized gelatin immobilization for cartilage tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, *7*(1), 234–243. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.08.015

Chen, J., Chu, B., & Hsiao, B. S. (2006). Mineralization of hydroxyapatite in electrospun nanofibrous poly(L-lactic acid) scaffolds. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, *79A*(2), 307–317. https://doi.org/10.1002/jbm.a.30799

Chiang, C. yuan, & Lloyd, D. R. (1996). Effects of process conditions on the formation of microporous membranes via solid-liquid thermally induced phase separation. *Journal of Porous Materials*, *2*(4), 273–285. https://doi.org/10.1007/BF00489808/METRICS

Chocholata, P., Kulda, V., & Babuska, V. (2019). Fabrication of Scaffolds for Bone-Tissue Regeneration. *Materials*, *12*(4), 568. https://doi.org/10.3390/ma12040568

Conoscenti, G., Schneider, T., Stoelzel, K., Carfì Pavia, F., Brucato, V., Goegele, C., La Carrubba, V., & Schulze-Tanzil, G. (2017). PLLA scaffolds produced by thermally induced phase separation (TIPS) allow human chondrocyte growth and extracellular matrix formation dependent on pore size. *Materials Science and Engineering C*, *80*, 449–459. https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.06.011

Dehghani, F., & Annabi, N. (2011). Engineering porous scaffolds using gas-based techniques. *Current Opinion in Biotechnology*, *22*(5), 661–666. https://doi.org/10.1016/J.COPBIO.2011.04.005

Dhandayuthapani, B., Yoshida, Y., Maekawa, T., & Kumar, D. S. (2011). Polymeric Scaffolds in Tissue Engineering Application: A Review. *International Journal of Polymer Science*, *2011*(ii), 1–19. https://doi.org/10.1155/2011/290602

Diba, M., Kharaziha, M., Fathi, M. H., Gholipourmalekabadi, M., & Samadikuchaksaraei, A. (2012). Preparation and characterization of polycaprolactone/forsterite nanocomposite porous scaffolds designed for bone tissue regeneration. *Composites Science and Technology*, *72*(6), 716–723. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.01.023

Diba, Mani, Fathi, M. H., & Kharaziha, M. (2011). Novel forsterite/polycaprolactone nanocomposite scaffold for tissue engineering applications. *Materials Letters*, *65*(12), 1931–1934. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.03.047

Duarte Campos, D. F., Drescher, W., Rath, B., Tingart, M., & Fischer, H. (2012). Supporting Biomaterials for Articular Cartilage Repair. *CARTILAGE*, *3*(3), 205–221. https://doi.org/10.1177/1947603512444722

Dubey, N., Bentini, R., Islam, I., Cao, T., Castro Neto, A. H., & Rosa, V. (2015). Graphene: A Versatile Carbon-Based Material for Bone Tissue Engineering. *Stem Cells International*, *2015*(June), 1–12. https://doi.org/10.1155/2015/804213

Ebhodaghe, S. O. (2021). Natural Polymeric Scaffolds for Tissue Engineering Applications. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, *32*(16), 2144–2194. https://doi.org/10.1080/09205063.2021.1958185

Elser, W. J., Thomas, R. A., & Steffen, G. I. (1935). The Desiccation of Sera and Other Biological Products (Including Microörganisms) in the Frozen State with the Preservation of the Original Qualities of Products So Treated. *The Journal of Immunology*, *28*(6), 433–473. https://doi.org/10.4049/JIMMUNOL.28.6.433

Eltom, A., Zhong, G., & Muhammad, A. (2019). Scaffold Techniques and Designs in Tissue Engineering Functions and Purposes: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/3429527

Esmaeili, E., Didekhani, R., Gohari, Z., & Khalili, M. (2023). Fabrication and characterization of PCL@PAN nanofibrous scaffold containing nature-derived oyster shell for bone tissue engineering applications. *Applied Physics A*, *129*(10), 670. https://doi.org/10.1007/s00339-023-06943-0

Fereshteh, Z. (2018). Freeze-drying technologies for 3D scaffold engineering. *Functional 3D Tissue Engineering Scaffolds: Materials, Technologies, and Applications*, 151–174. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100979-6.00007-0

Flosdorf, E. W. (1945). Drying Penicillin by Sublimation. *British Medical Journal*, *1*(4389), 216. https://doi.org/10.1136/BMJ.1.4389.216

Fu, W., He, X., Feng, B., Huang, C., Wang, H., Ge, Y., Hu, R., Yin, M., Xu, Z., Wang, W., & Zheng, J. (2015). Electrospun gelatin/polycaprolactone nanofibrous membranes combined with a coculture of bone marrow stromal cells and chondrocytes for cartilage engineering. *International Journal of Nanomedicine*, *10*, 2089. https://doi.org/10.2147/IJN.S79461

Garcia-Amezquita, L. E., Welti-Chanes, J., Vergara-Balderas, F. T., & Bermúdez-Aguirre, D. (2015). Freeze-drying: The Basic Process. *Encyclopedia of Food and Health*, 104–109. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00328-7

Gautam, S., Chou, C.-F., Dinda, A. K., Potdar, P. D., & Mishra, N. C. (2014). Fabrication and characterization of PCL/gelatin/chitosan ternary nanofibrous composite scaffold for tissue engineering applications. *Journal of Materials Science*, *49*(3), 1076–1089. https://doi.org/10.1007/s10853-013-7785-8

Gautam, S., Purohit, S. D., Singh, H., Dinda, A. K., Potdar, P. D., Sharma, C., Chou, C.-F., & Mishra, N. C. (2023). Surface modification of PCL-gelatin-chitosan electrospun scaffold by nano-hydroxyapatite for bone tissue engineering. *Materials Today Communications*, *34*(December 2022), 105237. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105237

Gay, S., Lefebvre, G., Bonnin, M., Nottelet, B., Boury, F., Gibaud, A., & Calvignac, B. (2018). PLA scaffolds production from Thermally Induced Phase Separation: Effect of process parameters and development of an environmentally improved route assisted by supercritical carbon dioxide. *Journal of Supercritical Fluids*, *136*(November 2017), 123–135. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.02.015

Gemeinhart, R. A., Park, H., & Park, K. (2000). *Pore Structure of Superporous Hyd-*

rogels.

Gentile, P., Mattioli-Belmonte, M., Chiono, V., Ferretti, C., Baino, F., Tonda-Turo, C., Vitale-Brovarone, C., Pashkuleva, I., Reis, R. L., & Ciardelli, G. (2012). Bioactive glass/polymer composite scaffolds mimicking bone tissue. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, *100A*(10), 2654–2667. https://doi.org/10.1002/JBM.A.34205

Gong, X., Tang, C. Y., Wong, C. T., Lu, W. W., Zhang, Y., Lam, W. M., Wu, S., & Liu, J. (2010). Fabrication of poly(lactic acid) scaffolds by a modified solvent casting/porogen leaching method. *E-Polymers*, *10*(1), 1–9. https://doi.org/10.1515/epoly.2010.10.1.1264

Govindarajan, D., Saravanan, S., Sudhakar, S., & Vimalraj, S. (2023). Graphene: A Multifaceted Carbon-Based Material for Bone Tissue Engineering Applications. *ACS Omega*. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07062

Grande, D. A., Southerland, S. S., Manji, R., Pate, D. W., Schwartz, R. E., & Lucas, P. A. (1995). Repair of Articular Cartilage Defects Using Mesenchymal Stem Cells. *Tissue Engineering*, *1*(4), 345–353. https://doi.org/10.1089/ten.1995.1.345

Holmes, B., Castro, N. J., Li, J., Keidar, M., & Zhang, L. G. (2013). Enhanced human bone marrow mesenchymal stem cell functions in novel 3D cartilage scaffolds with hydrogen treated multi-walled carbon nanotubes. *Nanotechnology*, *24*(36), 365102. https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/36/365102

Huang, H.-Y., Fan, F.-Y., Shen, Y.-K., Wang, C.-H., Huang, Y.-T., Chern, M.-J., Wang, Y.-H., & Wang, L. (2020). 3D poly-ε-caprolactone/graphene porous scaffolds for bone tissue engineering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *606*(July), 125393. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125393

Huang, R., Zhu, X., Zhao, T., & Wan, A. (2014). Preparation of tissue engineering porous scaffold with poly(lactic acid) and polyethylene glycol solution blend by solvent-casting/particulate-leaching. *Materials Research Express*, *1*(4), 045403. https://doi.org/10.1088/2053-1591/1/4/045403

Jaworek, A., Krupa, A., Lackowski, M., Sobczyk, A. T., Czech, T., Ramakrishna, S., Sundarrajan, S., & Pliszka, D. (2009). Nanocomposite fabric formation by electrospinning and electrospraying technologies. *Journal of Electrostatics*, *67*(2–3), 435–438. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2008.12.019

Ji, C., Annabi, N., Khademhosseini, A., & Dehghani, F. (2011). Fabrication of porous chitosan scaffolds for soft tissue engineering using dense gas CO2. *Acta Biomaterialia*, *7*(4), 1653–1664. https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2010.11.043

Jiang, T., Carbone, E. J., Lo, K. W. H., & Laurencin, C. T. (2015). Electrospinning of polymer nanofibers for tissue regeneration. *Progress in Polymer Science*, *46*, 1–24. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.12.001

Kane, R. J., & Roeder, R. K. (2012). Effects of hydroxyapatite reinforcement on the architecture and mechanical properties of freeze-dried collagen scaffolds. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *7*, 41–49. https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2011.09.010

Kim, H. Do, Bae, E. H., Kwon, I. C., Pal, R. R., Nam, J. Do, & Lee, D. S. (2004). Effect of PEG-PLLA diblock copolymer on macroporous PLLA scaffolds by thermally induced phase separation. *Biomaterials*, *25*(12), 2319–2329. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.09.011

Kim, H. W., Knowles, J. C., & Kim, H. E. (2005). Hydroxyapatite and gelatin composite foams processed via novel freeze-drying and crosslinking for use as temporary hard tissue scaffolds. *Journal of Biomedical Materials Research. Part A*, *72*(2), 136–145. https://doi.org/10.1002/JBM.A.30168

Kim, J. W., Taki, K., Nagamine, S., & Ohshima, M. (2009). Preparation of porous poly(L-lactic acid) honeycomb monolith structure by phase separation and unidirectional freezing. *Langmuir : The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, *25*(9), 5304–5312. https://doi.org/10.1021/LA804057E

Lao, L., Wang, Y., Zhu, Y., Zhang, Y., & Gao, C. (2011). Poly(lactide-co-glycolide)/hydroxyapatite nanofibrous scaffolds fabricated by electrospinning for bone tissue engineering. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, *22*(8), 1873–1884. https://doi.org/10.1007/s10856-011-4374-8

Lee, J. Y., Tan, B., & Cooper, A. I. (2007). CO2-in-water emulsion-templated poly(vinyl alcohol) hydrogels using poly(vinyl acetate)-based surfactants. *Macromolecules*, *40*(6), 1955–1961. https://doi.org/10.1021/MA0625197

Lee, S. S., Du, X., Kim, I., & Ferguson, S. J. (2022). Scaffolds for bone-tissue engineering. *Matter*, *5*(9), 2722–2759. https://doi.org/10.1016/j.matt.2022.06.003

Li, W. J., & Tuan, R. S. (2009). Fabrication and Application of Nanofibrous Scaffolds in Tissue Engineering. *Current Protocols in Cell Biology / Editorial Board, Juan S. Bonifacino ... [et Al.]*, *CHAPTER*(SUPPL. 42), Unit. https://doi.org/10.1002/0471143030.CB2502S42

Li, W., Laurencin, C. T., Caterson, E. J., Tuan, R. S., & Ko, F. K. (2002). Electrospun nanofibrous structure: A novel scaffold for tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research*, *60*(4), 613–621. https://doi.org/10.1002/jbm.10167

Li, X., Wang, C., Zhang, W., & Li, Y. (2010). Fabrication and compressive properties of Ti6Al4V implant with honeycomb-like structure for biomedical applications. *Rapid Prototyping Journal*, *16*(1), 44–49. https://doi.org/10.1108/13552541011011703

Lien, S. M., Ko, L. Y., & Huang, T. J. (2009). Effect of pore size on ECM secretion and cell growth in gelatin scaffold for articular cartilage tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, *5*(2), 670–679. https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2008.09.020

Lips, P. A. M., Velthoen, I. W., Dijkstra, P. J., Wessling, M., & Feijen, J. (2005). Gas foaming of segmented poly(ester amide) films. *Polymer*, *46*(22), 9396–9403. https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2005.07.052)

Liu, S., He, Z., Xu, G., & Xiao, X. (2014). Fabrication of polycaprolactone nanofibrous scaffolds by facile phase separation approach. *Materials Science and Engineering C*, *44*, 201–208. https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.08.012

Liu, Xiaohua, & Ma, P. X. (2004). Polymeric Scaffolds for Bone Tissue Engineering. *Annals of Biomedical Engineering*, *32*(3), 477–486. https://doi.org/10.1023/B:ABME.0000017544.36001.8e

Liu, Xudong, Liu, S., Liu, S., & Cui, W. (2014). Evaluation of oriented electrospun fibers for periosteal flap regeneration in biomimetic triphasic osteochondral implant. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, *102*(7), 1407–1414. https://doi.org/10.1002/jbm.b.33119

Long, J., Zhang, W., Chen, Y., Teng, B., Liu, B., Li, H., Yao, Z., Wang, D., Li, L., Yu, X. F., Qin, L., & Lai, Y. (2021). Multifunctional magnesium incorporated scaffolds by 3D-Printing for comprehensive postsurgical management of osteosarcoma. *Biomaterials*, *275*(December 2020), 120950. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2021.120950

Lu, T., Li, Q., Chen, W., & Yu, H. (2014). Composite aerogels based on dialdehyde nanocellulose and collagen for potential applications as wound dressing and tissue engineering scaffold. *Composites Science and Technology*, *94*, 132–138. https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2014.01.020

Mandal, B. B., & Kundu, S. C. (2009a). Cell proliferation and migration in silk fibroin 3D scaffolds. *Biomaterials*, *30*(15), 2956–2965. https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2009.02.006

Mandal, B. B., & Kundu, S. C. (2009b). Osteogenic and adipogenic differentiation of rat bone marrow cells on non-mulberry and mulberry silk gland fibroin 3D scaffolds. *Biomaterials*, *30*(28), 5019–5030. https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2009.05.064

Maquet, V., Boccaccini, A. R., Pravata, L., Notingher, I., & Jérôme, R. (2004). Porous poly(α-hydroxyacid)/Bioglass® composite scaffolds for bone tissue engineering. I: Preparation and in vitro characterisation. *Biomaterials*, *25*(18), 4185–4194. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.10.082

Mazzoli, A. (2013). Selective laser sintering in biomedical engineering. *Medical and Biological Engineering and Computing*, *51*(3), 245–256. https://doi.org/10.1007/S11517-012-1001-X/METRICS

Mironov, A. V., Mironova, O. A., Syachina, M. A., Popov, V. K., Gay, S., Lefebvre, G., Bonnin, M., Nottelet, B., Boury, F., Gibaud, A., Calvignac, B., Wang, S. D., Ma, Q., Wang, K., Ma, P. B., Kim, H. E. H. Do, Bae, E. H., Kwon, I. C., Pal, R. R., … Ramakrishna, S. (2012). Nonsolvent induced phase separation (NIPS)-based 3D plotting for 3-dimensionally macrochanneled poly(ε-caprolactone) scaffolds with highly porous frameworks. *Materials Science and Engineering C*, *32*(12), 4128–4138. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.02.029

Mirzaei, S., Karkhaneh, A., Soleimani, M., Ardeshirylajimi, A., Seyyed Zonouzi, H., & Hanaee-Ahvaz, H. (2017). Enhanced chondrogenic differentiation of stem cells using an optimized electrospun nanofibrous <scp>PLLA/PEG</scp> scaffolds loaded with glucosamine. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, *105*(9), 2461–2474. https://doi.org/10.1002/jbm.a.36104

Mohammadi, Y., Soleimani, M., Fallahi-Sichani, M., Gazme, A., Haddadi-Asl, V., Arefian, E., Kiani, J., Moradi, R., Atashi, A., & Ahmadbeigi, N. (2007). Nanofibrous Poly(ε-Caprolactone)/Poly(Vinyl Alcohol)/Chitosan Hybrid Scaffolds for Bone Tissue Engineering using Mesenchymal Stem Cells. *The International Journal of Artificial Organs*, *30*(3), 204–211. https://doi.org/10.1177/039139880703000305

Nail, S. L., Jiang, S., Chongprasert, S., & Knopp, S. A. (2002). Fundamentals of freeze-drying. *Pharmaceutical Biotechnology*, *14*, 281–360. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0549-5_6

Nathan, K. G., Genasan, K., & Kamarul, T. (2023). Polyvinyl Alcohol-Chitosan Scaffold for Tissue Engineering and Regenerative Medicine Application: A Review. *Marine Drugs*, *21*(5), 304. https://doi.org/10.3390/md21050304

Nga, N. K., Huyen, T. T. T., & Dung, T. N. (2023). Solvent casting-particulate leaching synthesis of a nano-SiO2/chitosan composite scaffold for potential use in bone tissue engineering. *Vietnam Journal of Chemistry*, *61*(5), 605–611. https://doi.org/10.1002/vjch.202300020

O'Brien, F. J., Harley, B. A., Yannas, I. V., & Gibson, L. (2004). Influence of freezing rate on pore structure in freeze-dried collagen-GAG scaffolds. *Biomaterials*, *25*(6), 1077–1086. https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00630-6

Oh, S. H., Park, I. K., Kim, J. M., & Lee, J. H. (2007). In vitro and in vivo characteristics of PCL scaffolds with pore size gradient fabricated by a centrifugation method. *Biomaterials*, *28*(9), 1664–1671. https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2006.11.024

Oladapo, B., Zahedi, A., Ismail, S., Fernando, W., & Ikumapayi, O. (2023). 3D-printed biomimetic bone implant polymeric composite scaffolds. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *126*(9–10), 4259–4267. https://doi.org/10.1007/S00170-023-11344-X/FIGURES/5

Pan, L., Pei, X., He, R., Wan, Q., & Wang, J. (2012). Multiwall carbon nanotubes/polycaprolactone composites for bone tissue engineering application. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *93*, 226–234. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.01.011

Panzavolta, S., Fini, M., Nicoletti, A., Bracci, B., Rubini, K., Giardino, R., & Bigi, A. (2009). Porous composite scaffolds based on gelatin and partially hydrolyzed alpha-tricalcium phosphate. *Acta Biomaterialia*, *5*(2), 636–643. https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2008.08.017

Park, S. A., Lee, S. H., & Kim, W. D. (2011). Fabrication of porous polycaprolactone/hydroxyapatite (PCL/HA) blend scaffolds using a 3D plotting system for bone tissue engineering. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *34*(4), 505–513. https://doi.org/10.1007/s00449-010-0499-2

Partap, S., Rehman, I., Jones, J. R., & Darr, J. A. (2006). "Supercritical carbon dioxide in water" emulsion-templated synthesis of porous calcium alginate hydrogels. *Advanced Materials*, *18*(4), 501–504. https://doi.org/10.1002/ADMA.200501423

Parthasarathy, J., Starly, B., Raman, S., & Christensen, A. (2010). Mechanical evalu-

ation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM). *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *3*(3), 249–259. https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2009.10.006

Patil, D., Kumari, S., & Chatterjee, K. (2023). Bioinspired nanotopography on 3D printed tissue scaffold to impart mechanobactericidal and osteogenic activities. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *228*(May), 113401. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2023.113401

Pınarbaşı, A., & Cengiz Çallıoğlu, F. (2022). Electrospinning of PVP Nanofibers and Optimization with Taguchi Experimental Design. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, *17*(2), 478–495. https://doi.org/10.29233/sdufeffd.1087764

Prabhakaran, M. P., Venugopal, J., & Ramakrishna, S. (2009). Electrospun nanostructured scaffolds for bone tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, *5*(8), 2884–2893. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.05.007

Puppi, D., Chiellini, F., Piras, A. M., & Chiellini, E. (2010). Polymeric materials for bone and cartilage repair. *Progress in Polymer Science*, *35*(4), 403–440. https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2010.01.006

Ratheesh, G., Venugopal, J. R., Chinappan, A., Ezhilarasu, H., Sadiq, A., & Ramakrishna, S. (2017). 3D Fabrication of Polymeric Scaffolds for Regenerative Therapy. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, *3*(7), 1175–1194. https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.6b00370

Reignier, J., & Huneault, M. A. (2006). Preparation of interconnected poly(ε-caprolactone) porous scaffolds by a combination of polymer and salt particulate leaching. *Polymer*, *47*(13), 4703–4717. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.04.029

Rohner, D., Hutmacher, D. W., Cheng, T. K., Oberholzer, M., & Hammer, B. (2003). In vivo efficacy of bone-marrow-coated polycaprolactone scaffolds for the reconstruction of orbital defects in the pig. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials*, *66*(2), 574–580. https://doi.org/10.1002/JBM.B.10037

Roseti, L., Parisi, V., Petretta, M., Cavallo, C., Desando, G., Bartolotti, I., & Grigolo, B. (2017). Scaffolds for Bone Tissue Engineering: State of the art and new perspectives. *Materials Science & Engineering. C, Materials for Biological Applications*, *78*, 1246–1262. https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2017.05.017

Rowlands, A. S., Lim, S. A., Martin, D., & Cooper-White, J. J. (2007). Polyurethane/poly(lactic-co-glycolic) acid composite scaffolds fabricated by thermally induced phase separation. *Biomaterials*, *28*(12), 2109–2121. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.12.032

Ryan, A. J., & O'Brien, F. J. (2015). Insoluble elastin reduces collagen scaffold stiffness, improves viscoelastic properties, and induces a contractile phenotype in smooth muscle cells. *Biomaterials*, *73*, 296–307. https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2015.09.003

Salerno, A., Guarnieri, D., Iannone, M., Zeppetelli, S., Di Maio, E., Iannace, S., & Netti,

P. A. (2009). Engineered mu-bimodal poly(epsilon-caprolactone) porous scaffold for enhanced hMSC colonization and proliferation. *Acta Biomaterialia*, *5*(4), 1082–1093. https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2008.10.012

Salerno, A., Oliviero, M., Di Maio, E., Iannace, S., & Netti, P. A. (2007). Design and preparation of μ-bimodal porous scaffold for tissue engineering. *Journal of Applied Polymer Science*, *106*(5), 3335–3342. https://doi.org/10.1002/APP.26881

Salerno, Aurelio, Iannace, S., & Netti, P. A. (2008). Open-Pore Biodegradable Foams Prepared via Gas Foaming and Microparticulate Templating. *Macromolecular Bioscience*, *8*(7), 655–664. https://doi.org/10.1002/MABI.200700278

Schoof, H., Apel, J., Heschel, I., & Rau, G. (2001). Control of pore structure and size in freeze-dried collagen sponges. *Journal of Biomedical Materials Research*, *58*(4), 352–357. https://doi.org/10.1002/JBM.1028

Seitz, H., Rieder, W., Irsen, S., Leukers, B., & Tille, C. (2005). Three-dimensional printing of porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials*, *74*(2), 782–788. https://doi.org/10.1002/JBM.B.30291

Shafiee, A., Seyedjafari, E., Sadat Taherzadeh, E., Dinarvand, P., Soleimani, M., & Ai, J. (2014). Enhanced chondrogenesis of human nasal septum derived progenitors on nanofibrous scaffolds. *Materials Science and Engineering: C*, *40*, 445–454. https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.04.027

Shafiee, A., Soleimani, M., Chamheidari, G. A., Seyedjafari, E., Dodel, M., Atashi, A., & Gheisari, Y. (2011). Electrospun nanofiber-based regeneration of cartilage enhanced by mesenchymal stem cells. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, *99A*(3), 467–478. https://doi.org/10.1002/jbm.a.33206

Sin, D., Miao, X., Liu, G., Wei, F., Chadwick, G., Yan, C., & Friis, T. (2010). Polyurethane (PU) scaffolds prepared by solvent casting/particulate leaching (SCPL) combined with centrifugation. *Materials Science and Engineering: C*, *30*(1), 78–85. https://doi.org/10.1016/j.msec.2009.09.002

Sodian, R., Loebe, M., Hein, A., Martin, D. P., Hoerstrup, S. P., Potapov, E. V., Hausmann, H., Lueth, T., & Hetzer, R. (2002). Application of stereolithography for scaffold fabrication for tissue engineered heart valves. *ASAIO Journal (American Society for Artificial Internal Organs : 1992)*, *48*(1), 12–16. https://doi.org/10.1097/00002480-200201000-00004

Sola, A., Bertacchini, J., D'Avella, D., Anselmi, L., Maraldi, T., Marmiroli, S., & Messori, M. (2019). Development of solvent-casting particulate leaching (SCPL) polymer scaffolds as improved three-dimensional supports to mimic the bone marrow niche. *Materials Science and Engineering: C*, *96*(November 2018), 153–165. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.10.086

Song, J., Gao, H., Zhu, G., Cao, X., Shi, X., & Wang, Y. (2015). The preparation and characterization of polycaprolactone/graphene oxide biocomposite nanofiber scaffolds and their application for directing cell behaviors. *Carbon*, *95*, 1039–1050. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.09.011

Stratton, S., Shelke, N. B., Hoshino, K., Rudraiah, S., & Kumbar, S. G. (2016). Bioactive polymeric scaffolds for tissue engineering. *Bioactive Materials*, *1*(2), 93–108. https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2016.11.001

Suamte, L., Tirkey, A., Barman, J., & Jayasekhar Babu, P. (2023). Various manufacturing methods and ideal properties of scaffolds for tissue engineering applications. *Smart Materials in Manufacturing*, *1*, 100011. https://doi.org/10.1016/J.SMMF.2022.100011

Subia, B., Kundu, J., & C., S. (2010). Biomaterial Scaffold Fabrication Techniques for Potential Tissue Engineering Applications. In *Tissue Engineering* (Issue 3, pp. 141–159). InTech. https://doi.org/10.5772/8581

Szustakiewicz, K., Gazińska, M., Kryszak, B., Grzymajło, M., Pigłowski, J., Wiglusz, R. J., & Okamoto, M. (2019). The influence of hydroxyapatite content on properties of poly(L-lactide)/hydroxyapatite porous scaffolds obtained using thermal induced phase separation technique. *European Polymer Journal*, *113*(January), 313–320. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.01.073

Tai, H., Mather, M. L., Howard, D., Wang, W., White, L. J., Crowe, J. A., Morgan, S. P., Chandra, A., Williams, D. J., Howdle, S. M., & Shakesheff, K. M. (2007). Control of pore size and structure of tissue engineering scaffolds produced by supercritical fluid processing. *European Cells & Materials*, *14*, 64–76. https://doi.org/10.22203/ECM.V014A07

Thadavirul, N., Pavasant, P., & Supaphol, P. (2014). Development of polycaprolactone porous scaffolds by combining solvent casting, particulate leaching, and polymer leaching techniques for bone tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, *102*(10), 3379–3392. https://doi.org/10.1002/jbm.a.35010

Thorvaldsson, A., Stenhamre, H., Gatenholm, P., & Walkenström, P. (2008). Electrospinning of Highly Porous Scaffolds for Cartilage Regeneration. *Biomacromolecules*, *9*(3), 1044–1049. https://doi.org/10.1021/bm701225a

Utkarsh, Hegab, H., Tariq, M., Syed, N. A., Rizvi, G., & Pop-Iliev, R. (2020). Towards Analysis and Optimization of Electrospun PVP (Polyvinylpyrrolidone) Nanofibers. *Advances in Polymer Technology*, *2020*(c), 1–9. https://doi.org/10.1155/2020/4090747

Wang, C., Tran, V., Ma, Z., & Wen, X. (2019). Rapid prototyping technologies for tissue regeneration. In *Rapid Prototyping of Biomaterials: Techniques in Additive Manufacturing*. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102663-2.00006-X

Wang, S. D., Ma, Q., Wang, K., & Ma, P. B. (2018). Strong and biocompatible three-dimensional porous silk fibroin/graphene oxide scaffold prepared by phase separation. *International Journal of Biological Macromolecules*, *111*, 237–246. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.021

Warnke, P. H., Douglas, T., Wollny, P., Sherry, E., Steiner, M., Galonska, S., Becker, S. T., Springer, I. N., Wiltfang, J., & Sivananthan, S. (2009). Rapid prototyping: Porous titanium alloy scaffolds produced by selective laser melting for bone tissue

engineering. *Tissue Engineering - Part C: Methods*, *15*(2), 115–124. https://doi.org/10.1089/ten.tec.2008.0288

Whang, K., Elenz, D. R., Nam, E. K., Tsai, D. C., Thomas, C. H., Nuber, G. W., Glorieux, F. H., Travers, R., Sprague, S. M., & Healy, K. E. (1999). Engineering bone regeneration with bioabsorbable scaffolds with novel microarchitecture. *Tissue Engineering*, *5*(1), 35–51. https://doi.org/10.1089/TEN.1999.5.35

Williams, J. M., Adewunmi, A., Schek, R. M., Flanagan, C. L., Krebsbach, P. H., Feinberg, S. E., Hollister, S. J., & Das, S. (2005). Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering. *Biomaterials*, *26*(23), 4817–4827. https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2004.11.057

Wiria, F. E., Shyan, J. Y. M., Lim, P. N., Wen, F. G. C., Yeo, J. F., & Cao, T. (2010). Printing of Titanium implant prototype. *Materials and Design*, *31*(SUPPL. 1), S101–S105. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2009.12.050

Woodfield, T. B. F., Guggenheim, M., Von Rechenberg, B., Riesle, J., Van Blitterswijk, C. A., & Wedler, V. (2009). Rapid prototyping of anatomically shaped, tissue-engineered implants for restoring congruent articulating surfaces in small joints. *Cell Proliferation*, *42*(4), 485–497. https://doi.org/10.1111/J.1365-2184.2009.00608.X

Wu, F., Liu, C., O'Neill, B., Wei, J., & Ngothai, Y. (2012). Fabrication and properties of porous scaffold of magnesium phosphate/polycaprolactone biocomposite for bone tissue engineering. *Applied Surface Science*, *258*(19), 7589–7595. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.04.094

Yang, Q., Chen, L., Shen, X., & Tan, Z. (2006). Preparation of Polycaprolactone Tissue Engineering Scaffolds by Improved Solvent Casting/Particulate Leaching Method. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, *45*(6), 1171–1181. https://doi.org/10.1080/00222340600976783

Yoshimoto, H., Shin, Y. M., Terai, H., & Vacanti, J. P. (2003). A biodegradable nanofiber scaffold by electrospinning and its potential for bone tissue engineering. *Biomaterials*, *24*(12), 2077–2082. https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00635-X

Young, M. J., Park, K., Jun, S. S., Kim, J. J., Rhie, J. W., & Han, D. K. (2008). Beneficial effect of hydrophilized porous polymer scaffolds in tissue-engineered cartilage formation. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials*, *85*(1), 252–260. https://doi.org/10.1002/JBM.B.30943

Yu, P., Lu, F., Zhu, W., Wang, D., Zhu, X., Tan, G., Wang, X., Zhang, Y., Li, L., & Ning, C. (2014). Bio-inspired citrate functionalized apatite coating on rapid prototyped titanium scaffold. *Applied Surface Science*, *313*, 947–953. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.06.113

Zhang, L., Hu, J., & Athanasiou, K. A. (2009). The Role of Tissue Engineering in Articular Cartilage Repair and Regeneration. *Critical Reviews™ in Biomedical Engineering*, *37*(1–2), 1–57. https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.v37.i1-2.10

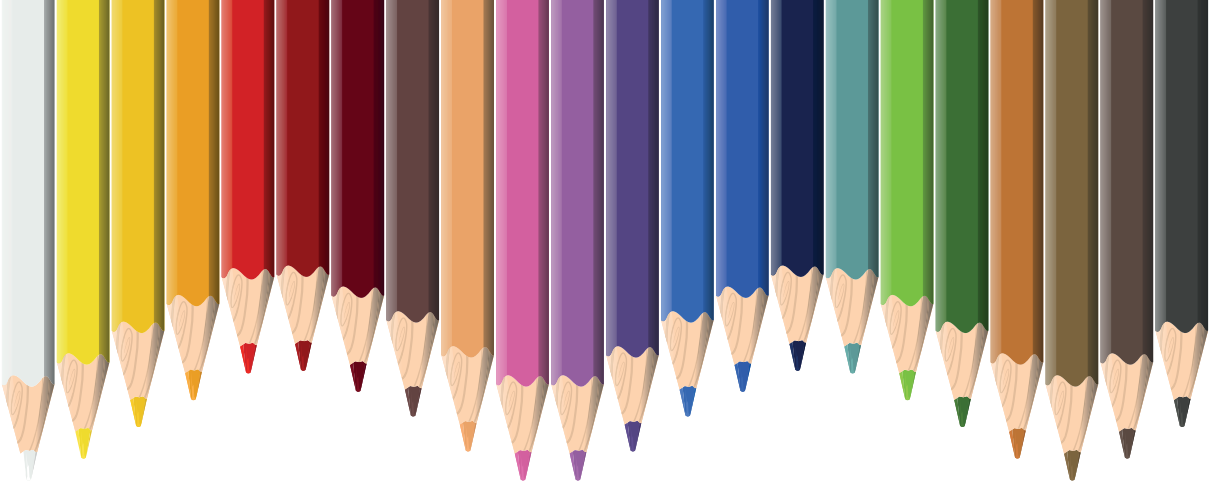
Zhang, Q., Zhou, J., Zhi, P., Liu, L., Liu, C., Fang, A., & Zhang, Q. (2023). 3D printing method for bone tissue engineering scaffold. *Medicine in Novel Techno-*

logy and Devices, *17*(August 2022), 100205. https://doi.org/10.1016/j.medntd.2022.100205

Zhang, Y., Venugopal, J. R., El-Turki, A., Ramakrishna, S., Su, B., & Lim, C. T. (2008). Electrospun biomimetic nanocomposite nanofibers of hydroxyapatite/chitosan for bone tissue engineering. *Biomaterials*, *29*(32), 4314–4322. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.07.038

Zhou, T., Zhang, L., Yao, Q., Ma, Y., Hou, C., Sun, B., Shao, C., Gao, P., & Chen, H. (2020). SLA 3D printing of high quality spine shaped β-TCP bioceramics for the hard tissue repair applications. *Ceramics International*, *46*(6), 7609–7614. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2019.11.261

Zhu, N., & Che, X. (2013). Biofabrication of Tissue Scaffolds. In *Advances in Biomaterials Science and Biomedical Applications*. InTech. https://doi.org/10.5772/54125



Bölüm 15

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE ORGANOMETALİK YAPILARIN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ[1]

Kübra ARDUÇ[2]
Mustafa KARAKAYA[3]

1 Bu çalışma Prof. Dr. Mustafa KARAKAYA danışmanlığında Kübra ARDUÇ'un "Boya Duyarlı Güneş Hücre Materyalleri İçin Yüksek Polarizasyon Hesaplamaları" adlı Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir.

2 Kübra ARDUÇ, Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Sinop, Türkiye, ORCID: 0000-0002-2091-063X, E-mail: kubraumurarduc@gmail.com

3 Prof. Dr. Mustafa KARAKAYA, Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Sinop, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6663-9008, E-mail: mkarakaya@sinop.edu.tr

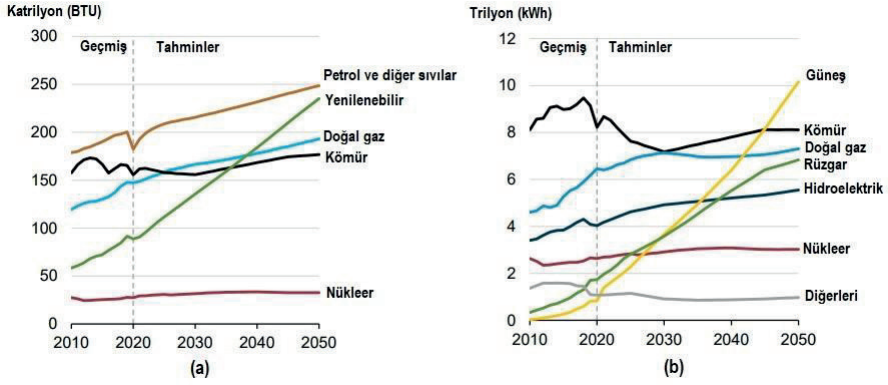
1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle enerji talebinde hızlı artış ve geleneksel enerji kaynaklarında azalma, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin önemine dikkat çekmektedir. Ayrıca fosil yakıtlardan kazanılan enerjinin çevrim, taşınım ve tüketim aşamalarında çevreye zararlı etkileri yenilenebilir kaynakların araştırma geliştirme çalışmalarına gereksinimi artırmıştır. Doğal enerji kaynakları yetersiz ülkelerin, ekonomik seviyelerini yükseltmek ve enerjide dışa bağımlılığı azaltmak için yenilenebilir enerji yatırımlarındaki artışları da dikkat çekicidir.

Coğrafi konumu itibariyle yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olan ülkemizde Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına göre yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat, günlük ortalama 7,5 saat, yıllık toplam güneş enerjisi 1.527 kWh/m².yıl ve günlük ortalama 4,18 kWh/m².gün olduğu tespit edilmiştir (ETKB, 2015). Kaynağı tükenmeyen ve yenilenebilir olduğundan solar teknolojiler, ülkelerin enerjide dışa bağımlılığını azaltırken kurulacakları bölgeler için ilave istihdam oluşturmakta ve ülke ekonomisine büyük katkıda bulunmaktadır. Yine, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2019-2023 stratejik planına göre Türkiye'de sürdürülebilir enerji arz ve güvenliğini sağlamak amacıyla yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik kurulu gücünün toplam kurulu güce oranının %59'dan % 65 seviyesine yükseltilmesi sağlanacak ve enerji verimliliğine yönelik kamuoyu farkındalığını artıracak çalışmalar yapılacağı bildirilmiştir. Avrupa ülkelerinde de, emisyonların azaltılması yönünde sürdürülebilir yeni hedefler belirlemiş ve Avrupa İklim Değişikliği Programı yoluyla, Avrupa Birliği düzeyinde çeşitli politikalar ve tedbirler kabul edilmiş, yenilenebilir enerji kullanım hedeflerinin artırılması ve enerji verimliliği konusunda iyileştirmeler amaçlanmıştır. Avrupa Birliği Çevre Ajansı'na göre, Avrupa Birliği Enerji Yol Haritası 2050 Planlamasında; sera gazı emisyonunun 1990 yılı emisyon seviyelerinin altına düşürülmesi amaçlanmıştır.

Dünya'da geçmiş dönemlerde ve gelecekte tahmin edilebilen birincil enerji kaynaklarının tüketimi ve bu kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisi üretimi verileri Şekil 1.1' de yer almaktadır. Burada sıvı yakıtlar birincil enerjinin en büyük kaynağı olmaya devam etmekte, ancak yenilenebilir enerji kullanımı

diğer yakıtların seviyesine ulaşacağı tahmin edilmektedir. Şekil 1.1.b' ye göre de elektrik enerjisi sektöründe önümüzdeki yaklaşık 20 yılda yenilenebilir enerji üretimi, özellikle güneş enerjisinde, doğal gaz ve kömürden üretime yaklaşacağı tahmin edilmektedir (EIA, 2021).



Şekil 1.1 (a) Dünya'da enerji kaynağına göre birincil enerji tüketimi, **(b)** Enerji kaynaklarına göre Dünya'da net elektrik üretimi (EIA, 2021).

2. SOLAR TEKNOLOJİDE BOYA DUYARLI GÜNEŞ HÜCRELERİ

Solar hücreler, kristal silikon ve ince film yapılar olarak iki ana grupta sınıflandırılır. Kristal silikon hücre tipleri; mono ve poli kristal yapıda sınıflanırken, ince film hücre tipleri de; bakır indiyum diselenid, kadmiyum tellürid, amorf silikon, mikro kristal ve boya duyarlı güneş hücreleri (DSSC) olarak gruplandırılır (Girgin, 2011). Kristal yapılı silisyumun erimiş yarı iletken silisyum kalıplarda soğutulması ile elde edilen polikristal fotovoltaik hücreler, kalıpta soğuyan yarı iletken blokların kare şeklinde ve 0,2-0,3 mm kalınlıklarında dilimlenir ve ~%13 verimliliğe sahiptir (Çıngı, 2019).

İnce film güneş pilleri için ilk çalışmalar M. Wolf ve J. Lofersky tarafından yapılarak daha yüksek verimlilik için ideal parametreler geliştirilmiştir. Bu teknikte, soğurma özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak çok daha az kalınlıkta yani mono kristalin ~1/500'ü kalınlığında güneş pilleri geliştirilmiştir. Hücre kalınlığının düşürülmesinden dolayı aktif hacimdeki

azalma, doyma akımını azaltarak, açık devre gerilimi arttırılmıştır (Ünal, 2006; Aydın, 2016). İnce film güneş pillerinde yeni bir gerilim artışının akımı yükseltmediği andaki akım değerine doyma akımı denir ve devre üzerinden hiç akım geçmiyor iken üretilen gerilime açık devre gerilimi denir. Açık devre gerilimi bir güneş pilinin üretebileceği maksimum gerilimdir (Aydın, 2016). Bakır-indiyum diselenid hücre yapıları, küçük hücreler için daha yüksek verimlilikte teknolojilerdir. Diğer ince film teknolojilerinden farklı olarak bu hücre tipleri genellikle bir cam alt tabaka üzerine biriktirmeyi içerir. Daha sonra hücre/alt tabaka kombinasyonuna ilave bir cam üst kapak lamine edilir. Mevcut tasarımlar, çözeltiden biriken ince bir kadmiyum sülfür tabakası gerektirir (Green, 2007). Kadmiyum tellürid hücrelerinde, kadmiyum sülfür tabakası, çözeltiden şeffaf iletken bir kalay oksit tabakası ile kaplanmış bir cam levha üzerine bırakılır. Bu katmanı yakın aralıklı süblimasyon, buhar taşıma, kimyasal püskürtme veya elektro kaplama gibi çeşitli tekniklerle ana kadmiyum tellür hücresinin biriktirilmesi takip eder. Kadmiyum tellürid modülleriyle ilgili ana sorun, kadmiyumun toksisite yani zehirlilik özelliğiyle ilgili olmasıdır. Fotovoltaik modüllerde kadmiyumun yoğunlaştırılmasının çevre için olumlu bir adım olduğu tartışılmaktadır (Green, 2007). Yasal bir zorunluluk olmasına rağmen, son 20 yılda nikel-kadmiyum pillerin Avrupa'da yalnızca yaklaşık % 4' ünün toplandığı iddia edilmiştir (Plachy, 2003; Green, 2007). Kadmiyum-tellürid alanındaki eski üreticilerden BP Solar ve Matsushita, çevresel kaygıların etkisine atıfta bulunarak bu teknolojiyi terk etmişlerdir (Schmela ve Kruitmann, 2002; Schmela, 2003; Green, 2007).

Düşük maliyetli güneş pilleri sınıfında olan DSSC'ler elektrolit materyal ile foto-duyarlı anot arasında yarı iletken ince filmlerden oluşur (Luceño-Sánchez ve ark., 2019). Bu teknolojide fotonlar ile boya duyarlılaştırıcı yapılar uyarılır, titanyum dioksit filmin iletim bandına bir elektron enjekte edilir ve elektronlar anoda yerleşir. Çoğunlukla katkılı kalay oksitten oluşan iletken cam tabakalar, güçlü ışık geçirgenliği ve elektriksel iletkenlik için kullanılan malzemelerdir (Gong ve ark.., 2012). Elektrolit içerisinde gerçekleşmekte olan redoks tepkimeleri sayesinde, boyar madde katyonları nötr hale gelir. Elektrolit yükseltgenir ve dış devreden gelen elektron ile indirgenir. Güneş pili, son aşamada sağlanan redoks tepkimeleri sayesinde sürekli olarak elektrik enerjisi üretimi sağlamış olur (Çakar, 2017).

Nano-kristal gözenekli yarı iletken elektrot tarafından emilen boyalar, DSSC' lerde duyarlaştırıcı olarak davranır ve ışınlarının emilmesi-

dönüştürülmesinde önemli bir görev üstlenir. Boya duyarlılaştıcılar organik, inorganik boya olarak sınıflandırılır. İnorganik boyalar DSSC' lerin büyük verimlilikle üretilmesi için önemli boyalardan olmasına karşılık saflaştırılmaları oldukça zor ve pahalıdır. Bu nedenle, pahalı ve nadir inorganik duyarlaştırıcılara alternatif bulmak için doğal boyalar en uygun alternatif olarak kabul edilir. DSSC' lerin avantajları; düşük üretim maliyeti, kolay ulaşılabilirlik, hammadde bulunabilirliğinin yüksek olması, çevresel risklerin olmaması ve dağınık ışık ve çok renkli seçeneklerde mükemmel performanslı olmasıdır (Adedokun ve ark., 2016).

Ren ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, redoks elektroliti ile hassaslaştırılmış titanyum dioksit mezo gözenekli filmde boya geliştirilmiş ve boyaya duyarlı güneş pilinin %12,6 güç dönüştürme verimliliğiyle önemli seviyede bir foto kararlılık gösterdiği vurgulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada sentezlenen boyaların standart koşullar altında güneş ışığında ölçülen fotovoltaik parametreleri ölçülmüş ve DSSC materyali bu boyaların en yüksek işgal edilen moleküler orbital ve en düşük boş moleküler orbital üzerinde döngüsel voltamogramları elde edilmiştir. Temel hal molekülünün indirgenmesi ve oksidasyon başlangıç potansiyelini içeren denklemle boşluk enerji seviyeleri yorumlanmıştır. Bu duyarlılaştırıcı boyalar için en yüksek enerjili moleküler orbital ile en düşük boş moleküler orbital enerji aralıklarının Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT) hesaplamalarının sonuçlarıyla tutarlı olduğu, spektroskopik ve elektronik özellikler bakımından da organik ürünlerin makul tasarım ve ışığa etkili duyarlılaştırıcılar olduğu bildirilmiştir (Ren ve ark., 2018).

Yine benzer konulu bir çalışmada, Samiee ve Taghvaeian (2019) tarafından tasarlanan nikel, paladyum ve platin içerikli komplekslerin DFT metoduyla geometrik yapıları, elektronik ve lineer olmayan özellikleri incelenmiştir. Araştırmacılar bu komplekslerin doğal bağ orbital analizleri, moleküler orbital dağılımları, enerji aralıkları, absorbe edilen dalga boyları, ışık hasat (harvesting) verimlilikleri, yük transfer tanımlayıcıları ve dipol momenti gibi elektronik özellikleri açısından tüm komplekslerin duyarlılaştırma özelliklerini karşılaştırmıştır. Polarize edilebilirlik ve birinci yüksek seviyeli polarize edilebilirlik hesaplama sonuçları yayınlanmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, metal merkezi ve ditiolat ligandlarının değişiminin özellikle ışık hasat verimlilik ve yüksek seviyeli polarize edilebilirlik olarak optoelektronik özelliklerin ayarlanmasında önemli rol oynadığı değerlendirilmiştir (Samiee ve Taghvaeian, 2019).

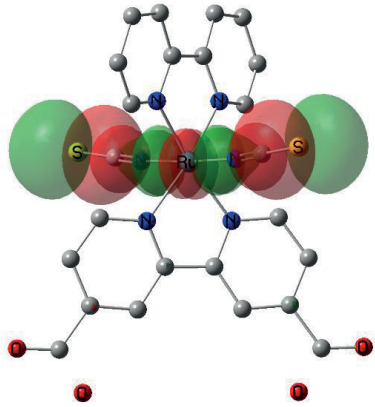
DSSC'ler için natural boya sınıfında yer alan ve literatürde biyofotovoltaikler olarak tanımlanan klorofil a ve krosin yapılarının statik ve dinamik doğrusal olmayan optik etkilerini, tek foton soğurma karakterizasyonlarını içeren çalışmalar da Karakas ve ark. (2017, 2018) tarafından yayınlanmıştır. Yine DSSC aygıtlarda kullanılan kinoksalin çekirdeğinin kombinasyonlarından olan kromoforların sentezi ve doğrusal/doğrusal olmayan optik etkileri üzerine yapılan son çalışmalardan birinde, D-π-A kromoforların π-konjugasyon köprüsünde yapısal değişimlerinin yüksek mertebeli polarize edilebilirlik değerlerinde önemli artışlara yol açtığı yorumlanmıştır (Islamova vd., 2023).

3. MATERYAL VE METOT

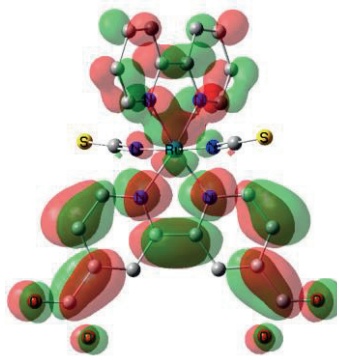
Bu bölümde, DSSC'ler için rutenyum tabanlı duyarlılaştırıcı organometalik bir kompleksin elektronik özellikleri, elektrik dipol moment bileşenleri ve frekansa bağlı lineer olmayan optiksel özellikleri incelenmiştir. Rutenyum tabanlı bu yapılar Chan ve ark. (2020) tarafından sentez çalışması yayınlanan $Ru(dcbpy)(bpy)(NCS)_2$ kompleksidir. Sembolik tanımlamalarda dcbpy; 4,4'-dikarboksilik-2,2'-bipiridin, NCS; izotiyosiyanat ve bpy; 2,2'-bipiridin yapılarını temsil etmektedir. Rutenyum tabanlı bu duyarlılaştırıcı; NCS ligandlar, bipiridin ligand ve dipiridofenazin ligandtan oluşmaktadır (Chan ve ark., 2020). Atomik koordinatların tanımlanması, optimizasyon yapılarının ve moleküler orbitallerin görüntülenmesi Gauss View yazılımda gerçekleştirilmiştir (Dennington ve ark., 2009). Konformerlerin geometri optimizasyonları, Becke'nin üç parametreli değişim fonksiyonu (B3) ve Lee-Yang-Parr korelasyon değişim fonksiyoneli (LYP) yaklaşımını içeren DFT metodu ile *CEP-121G* temel setinde sağlanmıştır (Hohenberg ve Kohn, 1964; Becke, 1988; Lee ve ark., 1988; Stevens ve ark., 1992). Gaussian09 yazılım programında *CEP-121G* temel seti için uygulanabilirlik aralığı periyodik çizelgede hidrojen (H)–radon (Rn) aralığındaki elementlerdir. Kompakt etkin potansiyeller (*compact effective potentials, CEP*) yaklaşımını içeren temel setler, *CEP-4G* etkin çekirdek potansiyeli (*ECP*) minimum temel seti, *CEP-31G* (*ECP split valance*) ve *CEP-121G* (*ECP triple-split*) temel setlerini içermektedir (Gobato ve ark., 2019). Elektronik özellikler, elektrik dipol moment bileşenleri ve frekansa bağlı lineer olmayan optiksel etkiler için hesaplamalar Gaussian 09W programında gerçekleştirilmiştir (Frisch ve ark., 2013).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

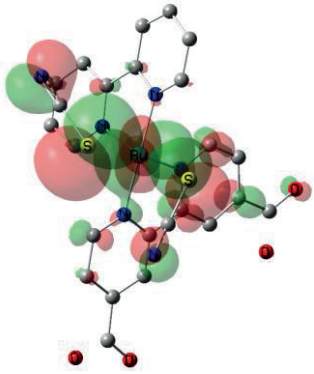
DSSC materyali olarak seçilen organometalik yapının üç farklı optimize edilmiş konformerlerinin en yüksek dolu (işgal edilen) moleküler orbital (YDMO) ve en düşük boş (işgal edilmemiş) moleküler orbital (DBMO) modelleme görüntüleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Burada optimize edilmiş organometalik yapının mevcut yüzeylerinde pozitif dağılımlar kırmızı, negatif dağılımlar ise yeşil tonlamalı modellenmiştir. Tüm yapılarda çoğunlukla en yüksek işgal edilmiş moleküler orbitaller rutenyum izotiyosiyanat ekseni boyunca dağılım göstermektedir. İşgal edilmemiş en düşük enerjili moleküler orbitaller de bipiridin ligand ve dipiridofenazin ligandlar üzerinde dağılmıştır. DBMO dağılımında bipiridin ligandta göre dipiridofenazin ligandlar üzerindeki yoğunluk dikkat çekmektedir. Özellikle konformer 2 (DBMO) yapısında dağılım neredeyse tümüyle -COO bağlantılı ligand üzerinde yoğunlaşmıştır. Organik/organometalik yapılarda moleküllerarası etkileşimler ile elektron donör ve akseptör grupları bulunan aromatikler, zıt karakterli gruplar arasındaki yük transferi nedeniyle yüksek mertebeli doğrusal olmayan etkiler oluşturmaktadır (Nalwa ve Miyata, 1996). OH ve COO bağlantıları; benzen, azobenzen gibi π-konjuge sisteme bağlanan, sırasıyla elektron donör ve akseptör grupları içinde verilmektedir. π-elektron yapılarından dolayı elektron verme özellikleri yüksek olan yapıların, doğrusal olmayan optik etkileri göstermesi beklenmektedir (Gözütok, 2018). Cheng ve ark. (1991)'nın benzen, tuluen gibi konjuge sistemler üzerine deneysel çalışmasında; donör/akseptör gruplarının verimlilikleri ve bu grupların güçlülüklerine göre doğrusal olmayan optiksel etkilerin büyüklükleri yayınlanmıştır. Önceki çalışmalarda YDMO-DBMO enerji boşlukları konformer 1, 2 ve 3 için sırasıyla 1,40, 2,08 ve 2,11 eV değerlerinde hesaplanmıştır (Arduç ve Karakaya, 2023). Chan ve ark. (2020) tarafından farklı metotta döngüsel voltametri (CV) yardımıyla yapılan moleküler orbital enerji analizlerinde konformer 1 yapısında duyarlılaştırıcı için 1,88 eV değerinde enerji bant aralığı yayınlanmıştır.



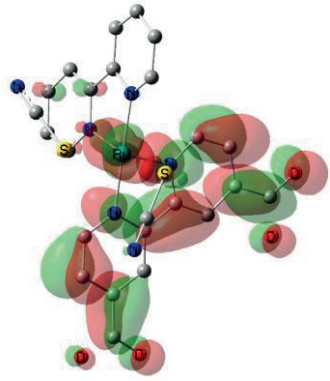
Konformer 1 (YDMO)



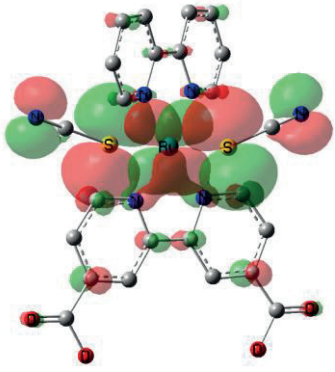
Konformer 1 (DBMO)



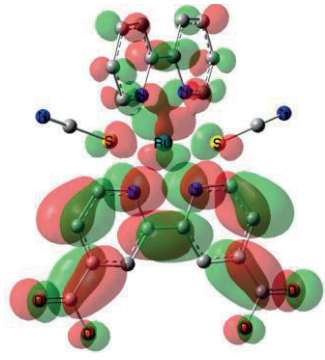
Konformer 2 (YDMO)



Konformer 2 (DBMO)



Konformer 3 (YDMO)



Konformer 3 (DBMO)

Şekil 4.1. Fotovoltaik sistemler için tasarlanan duyarlılaştırıcı materyallerin optimize edilmiş sınır moleküler orbital modellemeleri

Tablo 4.1' de elektrik dipol moment (μ) değerleri ve bileşenleri verilmiştir. Konformer 1'de *x, y, z* bileşenleri sırasıyla 1,88; 0,002 ve 0,0004 D yaklaşık değerlerindedir. Çok daha yüksek *x* bileşeni değeriyle, μ_{top} yaklaşık 1,88 Debye *x* yönünde yani metal- *bpy* ligand yönündedir.

Tablo 4.1. Elektrik dipol moment bileşenleri ve toplam değerleri

DSSC Duyarlılaştırıcılar	μ_{top}	μ_x	μ_y	μ_z
Konformer 1	1,8779	1,8779	0,0021	0,0004
Konformer 2	11,9539	0,8798	8,4037	8,4558
Konformer 3	0,2050	0,2048	0,0050	-0,0081
**Sonuçlar Debye (D) birimindedir.*				

Hesaplamaları yapılan bu komplekslerin yapısal kararlılıkları, dipol momentin büyüklüğü ile ilişkilidir ve dipol moment değeri düşük komplekslerin yapısal stabiliteleri yüksektir (Kıbrız ve ark., 2013; Sert ve ark., 2015). Yük ayrımından kaynaklanan dipol moment, yük ayrımı arasındaki mesafeden ve elektronegatiflik farkından kaynaklanır. Elektronegatifliğin artması dipol moment değerini de arttırır ve dipol moment bileşikte polaritenin bir ölçüsüdür (Housecroft ve Sharpe, 2008; Tro, 2008). Sıfıra yakın değerdeki dipol moment, yapıdaki bağ momentlerinin eşit büyüklükte ve zıt yönlü olduğunu göstermektedir (Karakaya, 2019). Konformerler için μ_{top} sıralaması 3<1<2 olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda konformer 1 ve 3 'ün elektrik dipol momentlerinin küçük değerlerde olduğu görülmektedir. Geometrik olarak bu iki duyarlılaştırıcı konformeri benzer simetrik yapıya sahiptir. Rutenyum ile *bpy* ligand bağlantı geometrisinde *Ru-N* ve *Ru-S* bağlantıları konformer 1 ve 3'ün elektrik dipol momentlerinde farklılık göstermektedir. Bu durum kükürtün azota kıyasla elektronegatiflik göstergesinin yüksekliğine atfedilebilir.

Frekansa bağlı ikinci mertebe yüksek polarize edilebilirlik değerleri optimize edilen her bir konformer için hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4.2'de verilmiştir. Frekansa bağlı değerler ω = 0,08562 a.b., λ=532,2 nm dalga boyunda hesaplanmıştır. Dinamik hesaplamalarda ikinci mertebe yüksek polarizasyonun vektör kısmı olan $\beta - V$ değeri, aşağıdaki bileşenler ile formülize edilmektedir;

$$\beta - V = (\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2)^{1/2} \quad (4.1)$$

Yukarıdaki formülde değişkenler olarak β_x, β_y ve β_z bileşenleri, bir diğer tanımlama ile $\beta_i (i = x, y, z)$ olarak aşağıdaki gibi verilir;

$$\beta_i = \frac{1}{3} \sum_{j=x,y,z} (\beta_{ijj} + \beta_{jij} + \beta_{jji}) \quad (4.2)$$

Tablo 4.2. Frekansa bağlı ikinci mertebe yüksek polarize edilebilirlik değerleri ve seçilen bileşenler için değerler

	β-V x(10^{-27} esu)	β_x x(10^{-27} esu)	β_y x(10^{-27} esu)	β_z x(10^{-27} esu)
Konformer 1	216,49	–0,02	–0,10	216,48
Konformer 2	0,16	0,04	0,11	–0,11
Konformer 3	1,51	0,06	0,04	–1,51

$\beta - V$ değerleri, konformerler için 1>3>2 sıralamasına sahip ve konformer 1, diğerlerine kıyasla çok büyük değerdedir. Seçilen yapıların sınır moleküler enerji aralıkları en düşük değere sahip konformer 1'de ikinci mertebe yüksek polarizasyonun vektör kısmı olan $\beta - V$ değerinin aşırı yüksek sonuçlanması, lineer olmayan optik özelliklerin teorisi ile uyumludur. Bu durum 1. konformerin, yüksek polarize edilebilirlik sonuçları ile lineer olmayan optik çalışmalarda daha etkili bir materyal olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ

Çalışmamızda, DSSC materyal olarak organometalik bir kompleksin konformerleri için elektronik özellikler, elektrik dipol moment bileşenler ve frekansa bağlı lineer olmayan optiksel özellikler yorumlanmıştır. Optimize edilen konformerlerde çoğunlukla en yüksek işgal edilmiş moleküler orbitaller, rutenyum izotiyosiyanat ekseni boyunca dağılım göstermektedir. İşgal edilmemiş en düşük enerjili moleküler orbitaller de bipiridin ligand ve dipiridofenazin ligandlar üzerinde dağılmıştır. DBMO dağılımı özellikle dipiridofenazin ligandlar üzerindeki yoğunlaşmıştır. Hesaplanan elektrik dipol moment toplam değerleri konformerler için 3<1<2 sıralamasına sahiptir. Düşük dipol moment değerinde komplekslerin yapısal kararlılıkları yüksektir. λ=532,2 nm dalga boyunda $\beta - V$ değeri, konformerler için 1>3>2

sıralamasına sahiptir. Seçilen yapıların sınır moleküler enerji aralıkları en düşük değere sahip 1. konformer'de ikinci mertebe yüksek polarizasyonun vektör kısmı olan $\beta - V$ değeri aşırı yüksek değerde hesaplanmıştır. Sonuçlar, lineer olmayan optik özelliklerin teorisi ile uyumludur. Boya duyarlı güneş pillerinin performans analizlerinde duyarlılaştırıcı yapıların etkisi literatürde önemli bir araştırma geliştirme alanıdır. Çalışmamızda elde edilen sonuçlarla, rutenyum merkezli ligandların değişimiyle yüksek mertebe polarize edilebilirlik kapsamında optoelektronik aygıtların geliştirilmesi, foton hasat verimliliğinde etkin rol üstlenebileceği şeklinde değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Adedokun, O., Titilope, K., Awodugba, A. O. (2016). Review on natural dye-sensitized solar cells (DSSC). International Journal of Engineering Technologies IJET, 2(2), 34-41.

Arduç, K., Karakaya, M. (2023). Dye Sensitive Solar Cell Materials and Density Functional Theory Applications. Balkan 9th International Conference on Applied Sciences, October 6 - 8, 2023 Edirne.

Aydın, E. (2016). Bakır İndiyum Sülfür İnce Film Güneş Pillerinin Bükülebilir ve Cam Alt Taşlar Üzerine Sprey Piroliz Yöntemi ile Üretimi. (Yayınlanmış doktora tezi), TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Becke, A. D. (1988). Density-functional exchange-energy approximation with correct asymptotic behavior, Physical Review Cilt: 38, Sayfa: 3098-3100.

Chan, K. F., Lim, H. N., Ahmad, H., Gowthaman, N. S. K. (2020). Photovoltaic performance of bipyridine and dipyridophenazine ligands anchored ruthenium complex sensitizers for efficient dye-sensitized solar cells. Solid State Sciences, 107, 106368.

Cheng, L. T., Tam, W., Marder, S. R., Stiegman, A. E., Rikken, G., Spangler, C. W. (1991). Experimental investigations of organic molecular nonlinear optical polarizabilities; A study of conjugation dependences, The Journal of Physical Chemistry, 95 (26), 10643-10652.

Çakar, S. (2017). Yeni Yaklaşımlarla Tanin Esaslı Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Geliştirilmesi. (Yayınlanmış doktora tezi), T.C Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çıngı A. (2019). Güneş Enerji Santrallerinde Kullanılan Fotovoltaik Panellerin Enerji Verimliliklerinin Belirlenmesi. (Yayınlanmış yüksek lisans tezi), T.C Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dennington, R., Keith, T. Millam, J. (2009). GaussView, version 5. Semichem Inc., Shawnee Mission.

EIA ABD Enerji Bilgi İdaresi (2021). https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

ETKB Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2015). https://enerji.gov.tr/bilgi- merkezi-enerji-gunes

Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B., Scuseria G.E., Robb M.A., Cheeseman J.R., Scalmani G., Barone V., Mennucci B., Petersson G.A., Nakatsuji H., Caricato M., Li X., Hratchian H.P., Izmaylov A.F., Bloino J., Zheng G., Sonnenberg J.L., Hada M., Ehara M., Toyota K., Fukuda R., Hasegawa J., Ishida M., Nakajima T., Honda Y., Kitao O., Nakai H., Vreven T., Montgomery Jr. J.A., Peralta J.E., Ogliaro F., Bearpark M., Heyd J.J., Brothers E., Kudin K.N., Staroverov V.N., Keith T., Kobayashi R., Normand J., Raghavachari K., Rendell A., Burant J.C.,. Iyengar S.S, Tomasi J., Cossi M., Rega N., Millam N.J., Klene M., Knox J.E., Cross J.B., Bakken V., Adamo C., Jaramillo J., Gomperts R., Stratmann R.E., Yazyev O., Austin A.J., Cammi R., Pomelli C., Ochterski J.W., Martin R.L., Morokuma K., Zakrzewski V.G., Voth G.A., Salvador P., Dannenberg J.J., Dapprich S., Daniels A.D., Farkas O., Foresman J.B., Ortiz J.V., Cioslowski J., Fox D.J. (2013) Gaussian 09, Revision D.01, Gaussian, Inc., Wallingford CT.

Girgin, M. H. (2011). Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralinin Fizibilitesi, Karaman Bölgesinde 5 MW'lık Güneş Enerji Santrali İçin Enerji Üretim Değerlendirilmesi ve Ekonomik Analizi. (Yayınlanmış yüksek lisans tezi), T.C İstanbul Üniversitesi Enerji Enstitüsü.

Gobato, R., Dosh, I. K. K., Heidari, A., Mitra, A., Gobato, M. R. R. (2019). Perspectives on the Elimination of Cancer Cells Using Rhodochrosite Crystal Through Synchrotron Radiation, and Absorption the Tumoral and Non–Tumoral Tissues. Arch Biomed Eng & Biotechnol, 3(2), 1-2.

Gong, J., Liang, J., Sumathy, K. (2012). Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): fundamental concepts and novel materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(8), 5848-5860.

Gözütok, A. (2018). Çeşitli Organik ve Organometalik Materyallerin Çizgisel Olmayan Optik Özelliklerinin Araştırılması. (Yayınlanmış doktora tezi), T.C Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Green, M. A. (2007). Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 18(1), 15-19.

Hohenberg, P., Kohn, W. J. P. R. (1964). Density functional theory (DFT). Phys. Rev, 136, B864.

Housecroft, C. E., Sharpe, A. G. (2008). Inorganic Chemistry. 3rd ed. Harlow: Pearson Education, Print, 44-46.

Islamova, L. N., Kalinin, A. A., Lebedeva, P. V., Fazleeva, G. M., Fominykh, O. D., Balakina M. Y. (2023). Synthesis of indole-based chromophores with a tricyanofuranyl acceptor and the study of the effect of the quinoxalinone core in the π-electron bridge on the linear and nonlinear optical properties. Journal for Organic Chemistry.

Karakas, A., Ceylan, Y., Karakaya, M., Taser, M., Terlemez, B. B., Eren, N., El Kouari Y., Lougdali M., Arof A. K., Sahraoui, B. (2018). One-photon absorption characterizations, dipole polarizabilities and second hyperpolarizabilities of chlorophyll a and crocin. Open Chemistry, 16(1), 1242-1247.

Karakas, A., Karakaya, M., Taser, M., Ceylan, Y., Arof, A. K., El Kouari, Y., Sahraoui, B. (2017). Second and third-order nonlinear optical behavior of natural pigment: chlorophyll and crocin. Ionics, 23(2), 343-346.

Karakaya M. (2019) Complexation Energies and Electronic-Structural Properties of Adamantane Derivatives: A DFT Study. Adıyaman University Journal of Science, 9 (2) 290-302.

Kıbrız, I. E., Sert, Y., Saçmacı, M., Şahin, E., Yıldırım, I., Ucun, F. (2013). Synthesis, characterization and vibrational spectra analysis of ethyl (2Z)-2-(2-amino-4-oxo-1, 3-oxazol-5 (4H)-ylidene)-3-oxo-3-phenylpropanoate. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 114, 491-501.

Lee, C., Yang, W., Parr, R. G. (1988). Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density. Physical review B, 37(2), 785-789.

Luceño-Sánchez, J. A., Díez-Pascual, A. M., Peña Capilla, R. (2019). Materials for photovoltaics: State of art and recent developments. International journal of molecular sciences, 20(4), 976.

Nalwa, H. S., Miyata, S. (1996). Nonlinear optics of organic molecules and polymers. CRC press. 896.

Plachy, J. (2003). Cadmium recycling in the United States in 2000. US Department of the Interior, US Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/circ/c1196o/

Ren, Y., Sun, D., Cao, Y., Tsao, H. N., Yuan, Y., Zakeeruddin, S. M., Wang P., Grätzel, M. (2018). A stable blue photosensitizer for color palette of dye-sensitized solar cells reaching 12.6% efficiency. Journal of the American Chemical Society, 140(7), 2405-2408.

Samiee, S., Taghvaeian. S. (2019). Geometrical structure, electronic and nonlinear optical properties of square-planar heteroleptic complexes containing bypridine and pyrazine dithiolate derivatives as dye-sensitized solar cell: A DFT study. Appl Organometal Chem. 33, 4626.

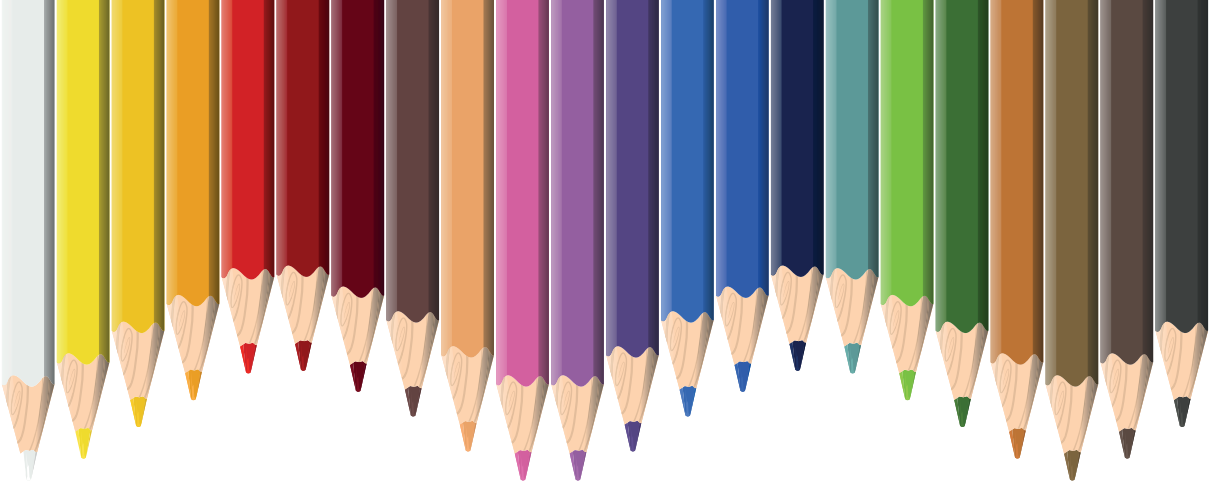
Schmela, M. (2003). Photon Int. January issue, 1, 22-24.

Schmela, M., Kruitmann, A. (2002). The Cheap and Clean?. Photon International, 38.

Stevens, W. J., Krauss, M., Basch, H., Jasien, P. G. (1992). Relativistic compact effective potentials and efficient, shared-exponent basis sets for the third-, fourth-, and fifth-row atoms. Canadian Journal of Chemistry, 70(2), 612-630.

Tro, N. J. (2008). Solutions for Chemistry: A Molecular Approach. Upper Saddle River: Pearson Education, Print,379-386.

Ünal, O. (2006). Güneş Pilleri. (Yayınlanmış yüksek lisans tezi), T.C Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.



Bölüm 16

15 kV XLPE İZOLELİ KABLONUN YAŞLANMA DURUMUNUN MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Mustafa KARHAN[1]

1 Mustafa KARHAN, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Çankırı, Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-6747-8971, mustafakarhan@karatekin.edu.tr

1.GİRİŞ

Elektrik enerjisi iletim ve dağıtımında kullanılan orta ve yüksek gerilim kablolarının hizmet süresinin uzun ömürlü, bakımının kolay, kayıp ve kaçağın ise minimum seviyede olması, yaşlanma olaylarından minimal düzeyde etkilenmesi ve güvenli olması gibi özellikler istenmektedir. Kabloların yalıtkan malzemesi ile ilgili olan bu özellikler, bozulma bölgelerinin tanımlanması, teşhisi ve muayenesi gibi ifadeleri öne çıkarmaktadır. Kabloların enerji nakil anlamında ilk kullanımından günümüze kadar farklı iletken ve polimerik yalıtkanlar kullanılmıştır (Ersoy, 2003; Uğur ve diğ., 2002; Karhan ve Uğur, 2016). EPR (Ethylene Propylene Rubber - Etilen Propilen Kauçuk) ve XLPE (Cross-linked Polyethylene - Çapraz Bağlı Polietilen) yaygın olarak kullanılan polimerik kablo yalıtkanlarıdır. (Werelius, 2001). PE (Polyethylene - Polietilen) malzeme, kablolarda 1942 yılında kullanılmaya başlanırken, 1968'de XLPE kabloların ilk olarak orta gerilimde kullanıldığı görülmektedir. (Orton, 2013).

Çapraz bağlı polietilen (XLPE), elektriksel, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı orta ve yüksek gerilim kablolarında yaygın olarak kullanılan bir elektriksel yalıtım malzemesidir. Çapraz bağlı polietilen yalıtkanlı kablolar, bu üstün özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Al-Arainy v.d., 2007; Karhan, 2017; Malik v.d.., 2012). Çapraz bağlı polietilen malzeme her ne kadar üst seviyede dielektrik özelliklere sahip olsa dahi hizmet süresi boyunca çalışma koşulları bakımından bazı yaşlanma olaylarının meydana gelmesi kaçınılmazdır. Çapraz bağlı polietilen malzemenin yaşlanmasında birçok faktör etkili olabilmektedir (Karhan, 2017; Karhan v.d., 2021). Polimerik malzemelerin fiziksel ve/veya kimyasal yaşlanması kaçınılmaz bir durumdur. Yalıtkanlarda bir elektrik alanının varlığıyla başlayabilen ve büyüyebilen elektriksel yaşlanma olayları meydana gelebilmektedir. (Lanca, 2002; Karhan v.d., 2021).

Literatürde makine öğrenmesi teknikleri kullanarak kablo ömrü tahminine yönelik ve kablo yaşlanmasının durum değerlendirmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Hu ve ark. (2021) kablo ömrü tahminine yönelik BP (Back Propagation – Geriye Yayılım) sinir ağını temel alan akıllı bir algoritma modeli önermişlerdir. Chang ve ark. (2019), hava boşluğu ve boşluk kusurları olan önceden kalıplanmış güç kablosu bağlantıları için yalıtkan bozulmasının başlangıç ve son aşamalarını değerlendirebilen bir karar ağacı yöntemi sunmuşlardır. Wu ve ark. (2021), Relief-F özelliği ağırlıklı

bulanık destek vektör makinesini temel alan bir XLPE kablo durum değerlendirme algoritması önermişlerdir. Pan ve ark. (2023), PSO-XGBoost algoritmasına dayalı MV-XLPE kablo yaşlanma durumunun değerlendirmişlerdir. Sundukları bu çalışmada parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmasını ve aşırı gradyan artırma (XGBoost) algoritmasını birleştiren PSO-XGBoost algoritmasına dayalı etkili bir değerlendirme modeli önermişlerdir.

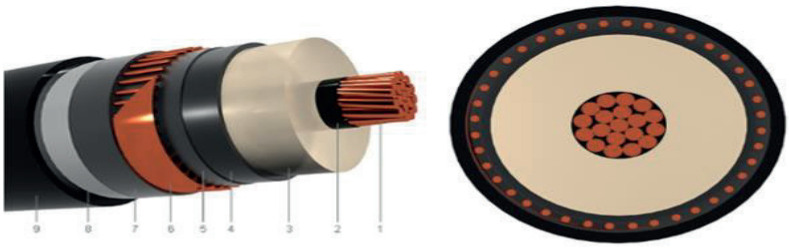
Bu çalışmada kablo yaşlanmasının durum değerlendirmesinde etkin birer faktör olan kısmi deşarj, görsel durum, doğal korozyon, servis verme yaşı ve yükleme durumu verileri kullanılarak orta ve yüksek gerilim uygulamalarında kullanılan kabloların yaşlanma durum değerlendirmesine ve analizine yönelik makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında kullanılan veriler Kaggle web sitesinden alınmıştır. Dataset 2018 yılına ait 2500 adet 15 kV XLPE izoleli kablonun verilerini içermektedir. Veri setindeki kablonun sağlık durumu, CEATI Rapor No. T134700-50/118 ile açıklanan durum puanlama yöntemi kullanılarak sınıflandırılmıştır (https://www.kaggle.com/datasets/utilityanalytics/utility-underground-cable-dataset1).

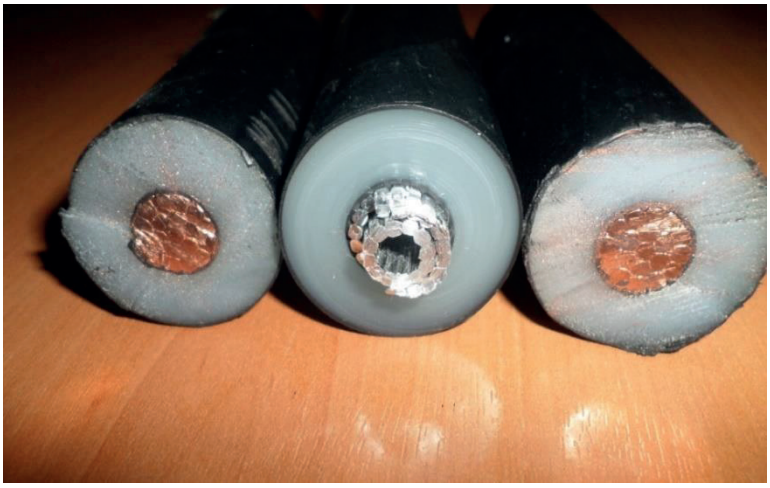
Şekil 1'de XLPE izoleli tek damarlı kablonun temel bileşenlerine yer verilmiştir. Şekil 2'de dış kılıfından ayrılmış bakır ve alüminyum iletkenli XLPE izoleli tek damarlı orta gerilim kabloları gösterilmiştir. XLPE izoleli kablolar uzun yıllarca dayanabilecek ve hizmet verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Servis verme yaşı bir seviyeye kadar kablonun yaşlanma durumunu yansıtmaktadır. Kablo yaşlandıkça yalıtkanlık performansı düşmektedir. Kısmi deşarjın boyutu yalıtkanlık performansını belirtmek için kullanılır. Görsel durum, kablonun görünümünü tanımlamak için iyi, orta veya kötü olarak sınıflandırılmıştır. Kablo uzun süre yeraltında kaldığından aşınmalar meydana gelebilmektedir. Doğal korozyon, kablo korozyonunun durumunu yansıtmaktadır. Büyük yük akımı, kablonun yaşlanma hızının daha hızlı olmasına neden olabilmektedir. Yükleme, kablonun tepe akımını yansıtır. Kısmi deşarj, görsel durum, doğal korozyon, servis verme yaşı ve yükleme durumu sınıflandırma için öznitelikler olarak belirlenmiştir (Pan v.d., 2023).

Kablonun sağlık indeksine göre kablo $H_{index}1$, $H_{index}2$, $H_{index}3$, $H_{index}4$ ve $H_{index}5$ olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır. $H_{index}5$, kablo durumunun iyi olduğu ve arıza riskinin düşük olduğu anlamına gelmektedir. $H_{index}1$, kablonun durumunun oldukça kötü olduğu ve arıza olasılığının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Durum indeksi ne kadar yüksek olursa, kablonun durumu o kadar iyi olmaktadır.



1) Çok telli bakır iletken
2) İç yarı iletken
3) XLPE yalıtkan
4) Dış yarı iletken
5) Yarı iletken şişen bant
6) Bakır ekran
7) Şişen bant
8) Alüminyum bant
9) PE dış kılıf

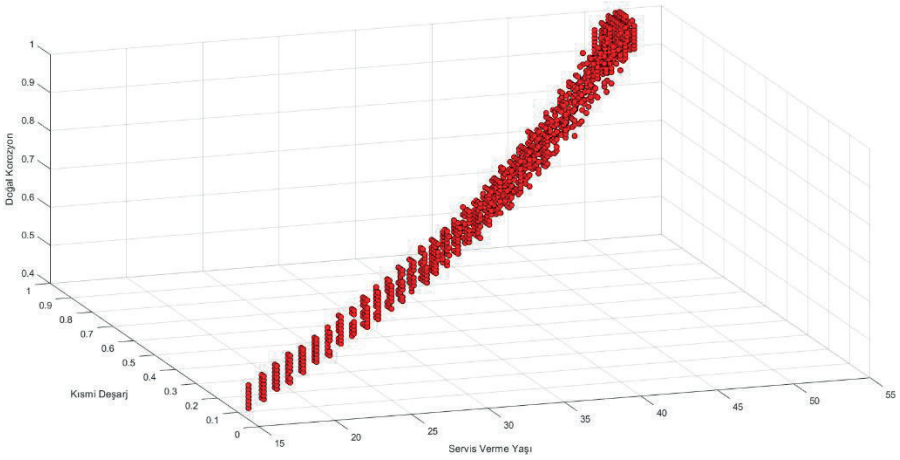
Şekil 1. *XLPE izoleli tek damarlı kablonun temel bileşenleri (Karhan, 2017)*



Şekil 2. *Bakır ve alüminyum iletkenli XLPE izoleli tek damarlı orta gerilim kabloları (Karhan, 2017)*

2.1. Veri Seti Düzenlenmesi ve Oluşturulması

Dataset, Kaggle web sitesinden alınmış 2018 yılına ait 2500 adet 15 kV XLPE izoleli kablonun verilerini içermektedir. Kablo yaşlanma durum değerlendirmesinde etkin birer parametre olan kısmi deşarj, görsel durum, doğal korozyon, servis verme yaşı ve yükleme durumu kablonun yaşlanma değerlendirmesine yönelik durum indeksi sınıflandırma işleminde öznitelikler olarak seçilmiştir. Kısmi deşarj ve doğal korozyon 0 ile 1 arasına normalize edilmiş değerlerdir. Kablonun sağlık indeksine göre kablo $H_{index}1$, $H_{index}2$, $H_{index}3$, $H_{index}4$ ve $H_{index}5$ olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır. Şekil 3'te servis verme yaşı, kısmi deşarj ve doğal korozyon değerleri için saçılım grafiğine yer verilmiştir.



Şekil 3. *Servis verme yaşı, kısmi deşarj ve doğal korozyon değerleri için saçılım grafiği*

2.2. Makine Öğrenmesi

Bu bölümde 15 kV XLPE izoleli kablonun yaşlanma durumunun değerlendirilmesinde sınıflandırma işlemine yönelik kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarından bahsedilmiştir.

Sınıflandırma ve regresyon uygulamalarında kullanılan k-en yakın komşu (K-Nearest Neighbor, k-NN) algoritması, makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırma yaklaşımlarından birisidir (Temiz, 2022). Sınıf bilgisinin belli olduğu veri setine, yeni bir verinin eklenmesiyle bu yeni verinin hangi sınıfa ait olduğunun tespiti için kullanılan bir algoritmadır (Cover ve Hart, 1967; Temiz, 2022). Yeni verinin veri setindeki diğer verilere olan uzaklığını (Öklid, Manhattan, Chebyshev, Minkowski vb. uzaklık ölçütleri) hesaplayarak sınıf bilgisine ulaşmayı sağlamaktadır (Temiz, 2022).

Denetimli bir sınıflandırma yöntemi olan Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines – SVM) hem sınıflandırma hem de regresyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Eğitim safhasında, eğitim veri setindeki veri ve etiketler arasındaki ilişkiyi öğrenmektedir. SVM, sınıflandırılacak gruplar arasına bir ayırma çizgisi tanımlayıp çizerek grupları ayırt etmektedir (Ay ve Yolaçan, 2022; Temiz, 2022). SVM, farklı sınıflar altında bulunan örnekleri ayıran bir ayırma çizgisini tanımlamaya çalışan bir yöntemdir (Ay ve Yolaçan, 2022).

Temelinde olasılık hesaplama bulunan Naive Bayes (NB) algoritmasının karar mekanizması, sınıflandırma aşamasında meydana gelen hataları minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu işlemi, sınıflandırılacak veri ile ilgili ön-bilgisi olması hasebiyle yapabilmektedir. Her olasılık hesabında, verileri pek çok kez taramaktadır. Naive Bayes algoritmasının temel olarak çalışma mantığı bir ihtimalin olması durumunda diğer ihtimalin olma olasılığını hesaplamaktadır (Temiz, 2022). Basit bir yapıya sahip olmakla beraber doğruluğu yüksek bir sınıflandırıcı olduğundan birçok alanda tercih edilen bir algoritmadır (Onan ve Korukoğlu, 2016; Uslu ve Akyol, 2021)

Rastgele orman algoritması, Breiman (2001), (Random Forest), yapısında birden fazla karar ağacı bulundurmaktadır. Her bir karar ağacı için n boyutlu eğitim veri kümesinden, n tane eleman yinelemeli seçilir dolayısıyla orijinal eğitim veri kümesinden farklı bir küme ortaya çıkarak, her bir karar ağacı bir tahminde bulunur. Tahminler arasından en yüksek üretilen sonuç tercih edilmektedir (Ay ve Yolaçan, 2022).

Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron - MLP) algoritması girdi, gizli ve çıkış katmanlarından oluşmaktadır. En popüler sinir ağı mimarileri arasında yer alan MLP temel bir sinir ağı ve denetimli öğrenme algoritmasıdır

(Baydoğan ve Alataş, 2021). Girdi ve çıktı katmanlarının arasında bulunan gizli katmanın sayısı birden fazla bulunabilir.

2.3. Performans Ölçüm Metrikleri

15 kV XLPE izoleli kablonun yaşlanma değerlendirmesinde durum indeksi sınıflandırma işlemine yönelik performans çıktıları incelenirken birkaç metrik üzerinde durulmuştur. Sınıflandırma konusunda literatürde de sıklıkla esas alınan ölçütler olan doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), F1-ölçüm ve ROC eğrisi altında kalan alan (Area Under Curve-AUC) değerleridir. ROC eğrisinde, y-ekseni TP_Oranını, x-ekseni FP_Oranı temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan metriklerin formülleri Eş. 1,2,3,4,5 ve 6'da verilmiştir. Performans ölçüm metrikleri hesaplanmasında kullanılan karmaşıklık matrisi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. *Karmaşıklık matrisi*

		Tahmin Edilen Değerler
Gerçek Değerler	Doğru Pozitif (TP)	Yanlış Negatif (FN)
	Yanlış Pozitif (FP)	Doğru Negatif (TN)

$$\text{Doğruluk (Accuracy)} = \frac{\sum(\text{TP} + \text{TN})}{\sum(\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN})} \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik (Precision)} = \frac{\sum(\text{TP})}{\sum(\text{TP} + \text{FP})} \quad (2)$$

$$\text{Hassasiyet (Recall)} = \frac{\sum(\text{TP})}{\sum(\text{TP} + \text{FN})} \quad (3)$$

$$\text{F1_Ölçüm} = \frac{2 \times (kesinlik \times hassasiyet)}{kesinlik + hassasiyet} \quad (4)$$

$$\text{TP_Oranı} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (5)$$

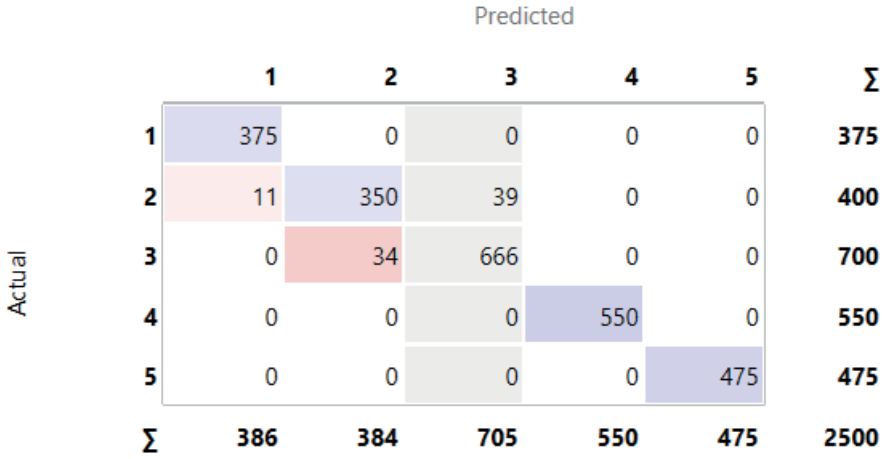
$$\text{FP_Oranı} = \frac{\text{FP}}{\text{FP} + \text{TN}} \tag{6}$$

3. BULGULAR

15 kV XLPE izoleli kablonun yaşlanma durumunun değerlendirilmesine yönelik sınıflandırılması işlemi için eğitim ve test verilerinin belirlenmesinde veri kümesinin k sayıda eşit boyutlu parçalara ayrıldığı k-katlamalı çapraz doğrulama (k-fold Cross Validation yöntemi kullanılmıştır. Tablo 2'de sınıflandırma sonuçları k-katlamalı çapraz doğrulama (5-fold Cross Validation) değerlendirme yöntemi kullanılarak gösterilmiştir. Değerlendirme ölçütlerine göre sınıflandırma doğruluk değerleri sırasıyla Neural Network, Random Forest, SVM, Naive Bayes ve k-NN yöntemleri için elde edilmiştir. Sunulan bu çalışmada sinir ağı tabanlı sınıflandırma işleminde geri-yayılım (backpropagation) algoritması ile çalıştırılan Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı (Multilayer Perceptron Neural Network) kullanılmıştır. Neural Network algoritmasında gizli katmanda 100 nöron kullanılmış ve iterasyon sayısı da 500 olarak belirlenmiştir. k-NN'de Öklid uzaklığı seçilmiş ve komşuluk değeri de 3 olarak belirlenmiştir. Kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinin değerlendirilmesinde en yüksek doğruluk değeri %96,6 ile Neural Network, en düşük doğruluk değeri %84,3 ile k-NN için elde edilmiştir. Şekil 4'te Neural Network için karmaşıklık matrisi verilmiştir.

Tablo 2. *XLPE izoleli kablonun yaşlanma durumunun değerlendirilmesine yönelik sınıflandırma sonuçları (5-fold cross validation)*

Model	AUC	Doğruluk	F1	Kesinlik	Hassasiyet
Neural Network	0,998	**0,966**	0,966	0,966	0,966
Random Forest	0,997	0.964	0,964	0,964	0.964
SVM	0,998	0,960	0,960	0,960	0,960
Naive Bayes	0,965	0,868	0,836	0,896	0,868
k-NN	0,960	0,843	0,840	0,842	0,843

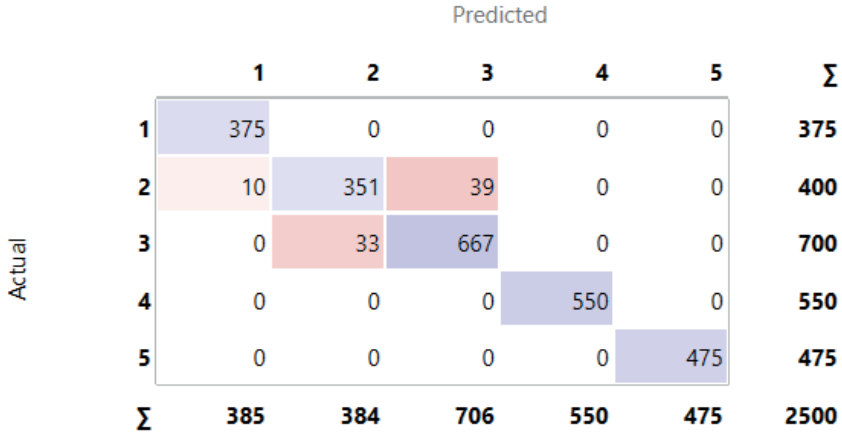


Şekil 4. *Sinir ağları için karmaşıklık matrisi (5-fold cross validation)*

Tablo 3'te sınıflandırma sonuçları k-katlamalı çapraz doğrulama (10-fold Cross Validation) değerlendirme yöntemi kullanılarak gösterilmiştir. Değerlendirme ölçütlerine göre sınıflandırma doğruluk değerleri sırasıyla Neural Network, Random Forest, SVM, Naive Bayes ve k-NN yöntemleri için elde edilmiştir. Kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinin değerlendirilmesinde en yüksek doğruluk değeri %96,5 ile Neural Network, en düşük doğruluk değeri %85,2 ile k-NN için elde edilmiştir. Şekil 5'te Neural Network için karmaşıklık matrisi verilmiştir.

Tablo 3. *XLPE izoleli kablonun yaşlanma durumunun değerlendirilmesine yönelik sınıflandırma sonuçları (10-fold cross validation)*

Model	AUC	Doğruluk	F1	Kesinlik	Hassasiyet
Neural Network	0,998	**0,965**	0,965	0,965	0,965
Random Forest	0,997	0,963	0,963	0,963	0,963
SVM	0,998	0,961	0,961	0,961	0,961
Naive Bayes	0,966	0,869	0,837	0,894	0,869
k-NN	0,963	0,852	0,850	0,852	0,852



Şekil 5. *Sinir ağları için karmaşıklık matrisi (10-fold cross validation)*

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kablo yaşlanması, güç sistemlerine yönelik temel güvenlik risklerinden biridir. Güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan kablolarla birlikte kablo yaşlanma durumunun doğru değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, Kaggle web sitesinden alınan 2018 yılına ait 2500 adet 15 kV XLPE izoleli kablonun verileri kullanılmıştır. Veri setindeki kablonun sağlık durumu, CEATI Rapor No. T134700-50/118 ile açıklanan durum puanlama yöntemi kullanılarak sınıflandırılmıştır. Kablo yaşlanma durum değerlendirmesinde etkin birer faktör olan kısmi deşarj, görsel durum, doğal korozyon, servis verme yaşı ve yükleme durumunun dahil edildiği veriler kullanılmıştır. Kablonun sağlık indeksine göre kablo $H_{index}1$, $H_{index}2$, $H_{index}3$, $H_{index}4$ ve $H_{index}5$ olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır.

Kablonun yaşlanma değerlendirmesine yönelik durum indeksi sınıflandırma işleminde SVM, Random Forest, k-NN, Neural Network ve Naive Bayes yöntemleri kullanılmıştır. Değerlendirme ölçütlerine göre en yüksek başarım oranı Neural Network için elde edilmiştir. Sınıflandırma için kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri arasında en yüksek doğruluk değeri %96,6 (5-fold Cross Validation) ile Neural Network, en düşük doğruluk değeri %84,3 (5-fold Cross Validation) ile k-NN için elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma ile orta ve yüksek gerilim uygulamalarında kullanılan kabloların

yaşlanma durum değerlendirmesine ve analizine yönelik makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Bu bağlamda kabloların yaşlanma durumları kısmi deşarj, görsel durum, doğal korozyon, servis verme yaşı ve yükleme durumuna bağlı olarak analizi gerçekleştirilebilecektir.

KAYNAKLAR

Ahmad, A. S., Ghosh, P. S., Aljunid, S. A. K., Said, H. A. I., & Hussain, H. (2001). Artificial neural network for contamination severity assessment of high voltage insulators under various meteorological conditions. Aupec, Perth.

Al-Arainy, A., Malik, N. H., Qureshi, M. I., & Al-Saati, M. N. (2007). The performance of strippable and bonded screened medium-voltage XLPE-insulated cables under long-term accelerated aging. IEEE Transactions on Power Delivery, 22(2), 744-751.

Ay, A.K., & Yolaçan, E. (2022). Yeniden Örnekleme Metotlarının Kredi Kartı Sahtecilik Tespiti için Topluluk Öğrenmesine Kapsamlı Analizi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(5), 1005-1015.

Baydoğan, V. C., & Alataş, B. (2021). Çevrimiçi Sosyal Ağlarda Nefret Söylemi Tespiti için Yapay Zeka Temelli Algoritmaların Performans Değerlendirmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33(2), 745-754.

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, 45, 5-32.

Chang, C. K., Lai, C. S., & Wu, R. N. (2019). Decision tree rules for insulation condition assessment of pre-molded power cable joints with artificial defects. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 26(5), 1636-1644.

Cover, T., & Hart, P. (1967). Nearest neighbor pattern classification. IEEE transactions on information theory, 13(1), 21-27.

Ersoy, A. (2003). Kablo polimerlerinde ağaç oluşumu ve modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi.

https://www.kaggle.com/datasets/utilityanalytics/utility-underground-cable-dataset1 (Erişim Tarihi:01.12.2023)

Hu, Y., Huang, C., Zhang, D., Pang, C., Wang, J., & Dong, C. (2021, November). Cable Life Prediction Based on BP Neural Network. In 2021 International Conference on Networking Systems of AI (INSAI) (pp. 258-262). IEEE.

Khan, A. A., Malik, N., Al-Arainy, A., & Alghuwainem, S. (2012, September). A review of condition monitoring of underground power cables. In 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (pp. 909-912). IEEE.

Karhan, M., (2017). Yüksek gerilim dağıtım kablolarındaki su ağacı olayının görüntü işleme teknikleriyle incelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi.

Karhan, M., Çakır, M. F., & Uğur, M. (2021). A new approach to the analysis of water treeing using feature extraction of vented type water tree images. Journal of Electrical Engineering & Technology, 16, 1241-1252.

Karhan M., Uğur M. (2016). XLPE izoleli tek damarlı orta gerilim kablolarında elektrik alanının sulu ağaçlanmaya etkisinin incelenmesi, Güç Sistemleri Konferansı (GSK2016), İstanbul, Türkiye.

Lanca M.C. (2002). Electrical ageing studies of polymeric insulation for power cables. Thesis (PhD), Universidade Nova De Lisboa.

Malik, N. H., Qureshi, M. I., Al-Arainy, A. A., Saati, M. N., Al-Natheer, O. A., & Anam, S. (2012). Performance of water tight cables produced in Saudi Arabia under accelerated aging. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19(2), 490-497.

Onan, A., & Korukoğlu, S. (2016). Metin sınıflandırmada öznitelik seçim yöntemlerinin değerlendirilmesi. Akademik Bilişim.

Orton, H. (2013). History of underground power cables, IEEE Electrical Insulation Magazine, 29(4), 52-57.

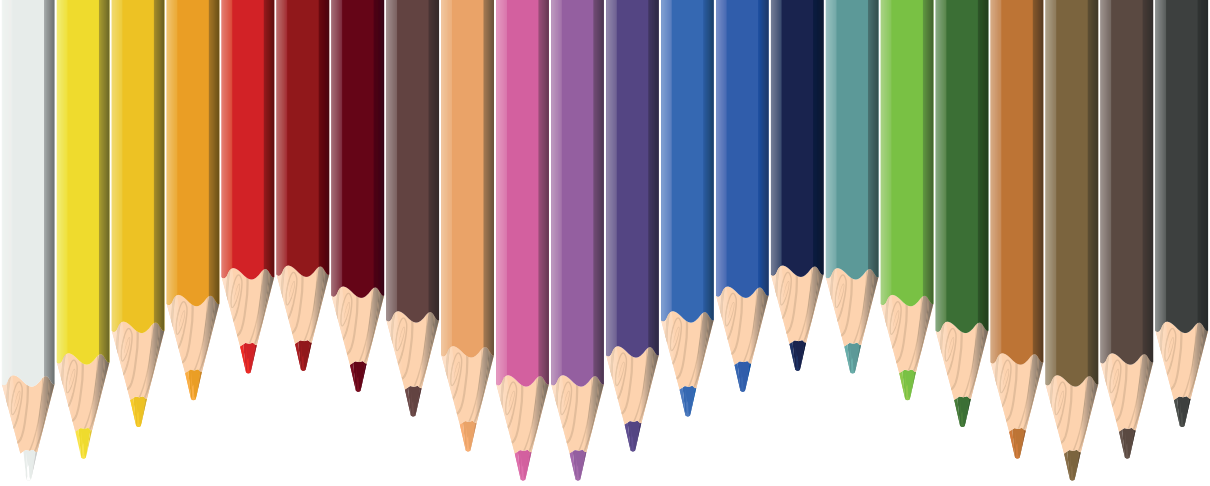
Pan, Q., Zhang, C., Wei, X., Wan, A., & Wei, Z. (2023). Assessment of MV XLPE cable aging state based on PSO-XGBoost algorithm. Electric Power Systems Research, 221, 109427.

Temiz, C.T. (2022).Yüksek Benzerlikli Nesnelerin Makine Öğrenmesi Tabanlı Sınıflandırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.

Uslu, O., & Akyol, S. (2021). Türkçe Haber Metinlerinin Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanılarak Sınıflandırılması. Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi, 2(1), 15-20.

Werelius, P. (2001). Development and application of high voltage dielectric spectroscopy for diagnosis of medium voltage XLPE cables, Thesis (PhD), Elektrotekniska system Stockholm.

Wu, X., Liu, Y., Wang, L., Ren, X., & Tan, X. (2021, February). XLPE cable health assessment based on Relief-F feature weighted FSVM. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 675, No. 1, p. 012147). IOP Publishing.



Bölüm 17

ATIK SULARDAN BOYA GİDERİMİNDE SİKLODEKSTRİN TEMELLİ ADSORBANLAR

Halil İbrahim ÇETİNTAŞ[1]

1 Öğr. Gör. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, Sivas, Türkiye. hcetintas@cumhuriyet.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-1769-0098

GİRİŞ

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin bir sonucu olarak su kaynaklarının giderek azalması ve artan nüfusla birlikte endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerde suya olan talebin artması nedeniyle, su kalitesinin iyileştirilmesi dünya çapında çözülmesi gereken en önemli çevresel sorunlardan biri haline gelmiştir (Da Silva ve diğerleri, 2021). Su ise şüphesiz, insanın hayatta kalması ve sosyal gelişimi için gerekli olan temel maddedir (Gleick, 1996). Ancak kontrolsüz bir şekilde gerçekleştirilen insan faaliyetlerinin kötü bir sonucu olarak, organik kimyasallar, boyalar, ağır metaller ve pestisitler gibi farklı kirletici türleri suya karışarak geri dönüşü oldukça zor bir kirliliğe neden olmaktadır. (Schweitzer ve Noblet, 2018). Suda bulunan bu zararlı kirletici maddeler ise, besin zinciri aracılığıyla birikerek, organizma üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır (Wang vd, 2019).

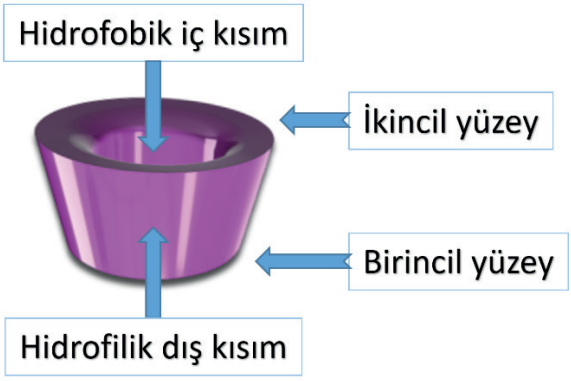
Dünya genelinde her yıl 280.000 ton atık miktarı ile sentetik boyalar, sudaki kirleticilerin başında gelmektedir (Al-Ghoti ve Dib, 2020). Bu boyalar, yüksek alkalinite, aşırı oksidasyon talebi ve yüksek katı içeriği ile karakterize edilir ve biyolojik parçalanmaya karşı oldukça dirençlidir. Endüstriyel deşarjlarda boyayla kirlenmiş suyun arıtılması ise, son derece yenilikçi çözümler gerektiren ve sürekli büyüyen bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır (Çetinkaya ve diğerleri, 2023a).

Geleneksel aktif çamur ve biyofiltrasyon işlemleri, her türlü kirletici maddenin giderilmesinde nispeten düşük bir verimlilik göstermektedir (Tran ve diğerleri, 2017). Gelişmiş oksidasyon işlemleri ve membran arıtma işlemleri ise, sudaki organik kirleticileri gidermede oldukça etkilidir ancak bunların saha uygulamaları, yüksek enerji tüketimi ve işletme maliyetleri nedeniyle sınırlıdır. Tüm bunlarla karşılaştırıldığında adsorpsiyon teknolojisi, yaygın, ekonomik ve verimli bir su arıtma yöntemi olarak kabul edilmektedir (Liu ve diğerleri, 2020).

Potansiyel toksisiteleri ve kanserojen etkileri nedeniyle boyalar, çok çeşitli çevresel araştırmaların konusu olmuştur (Çetinkaya ve diğerleri, 2023b). Son yıllarda, birçok farklı kaynaktan elde edilebilen ve toksik olmayan ucuz polisakkaritler atık sulardan boya gideriminde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Üretimi oldukça kolay siklik bir polisakkarit olan siklodekstrin (CD) ise, çok uzun bir süredir tıptan gıdadaya, tekstilden tarıma birçok alanda yaygın olarak kullanılmakta olup, CD'lerin çevre kirliliği uygulamalarında yüksek bir potansiyele sahip olduğu geçtiğimiz yüzyılın sonunda ancak anlaşılmıştır (Tian ve diğerleri, 2021). Bugün CD'ler, başta boyar maddeler olmak üzere sudan zararlı kirleticilerin gideriminde halen etkili adsorbanlar olarak araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

1.SİKLODEKSTRİNLER

CD'ler, nişastan ve türevlerinin enzimatik bozunma tepkimesi ile elde edilen ve glikoz ünitelerinden meydana gelen kafes yapılı doğal oligosakkaritlerdir (Ahmed ve diğerleri, 2012). Yapısındaki glikoz ünitelerinin sandalye formunda olmasından dolayı CD'lerin üç boyutlu yapılarının konik silindir biçiminde olduğu belirlenmiştir (Çetintaş, 2016). Yapılarının dış kısmı hidrofilik, iç kısımları ise diğer molekülleri içine hapsedebilen hidrofobik bir kaviteden meydana gelen CD'ler (Şekil 1), sahip oldukları bu eşsiz özelliklerinden dolayı farmasötik, kozmetik, temizlik, gıda, tıp, çevre, tarım, tekstil ve biyoteknoloji gibi birçok endüstriyel uygulamanın merkezinde yer almaktadır (Crini, 2020).



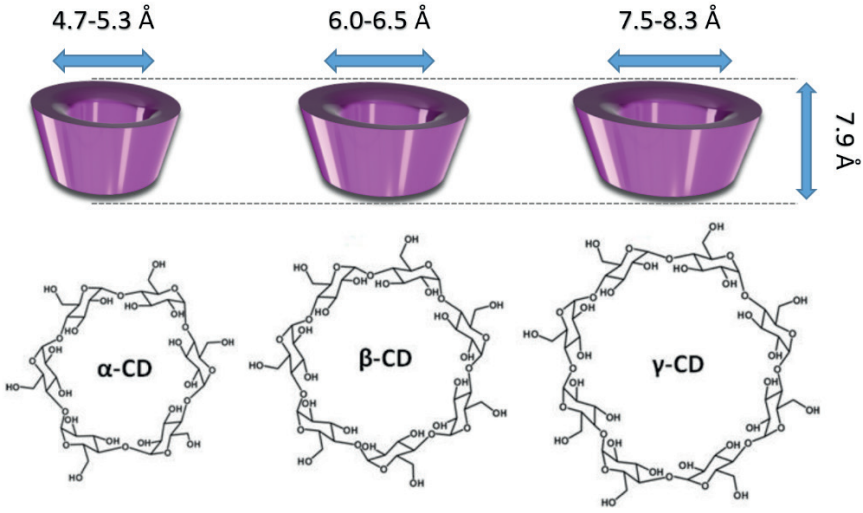
Şekil 1: *CD kafes yapısı şematik gösterimi*

130 yıldan uzun bir süredir araştırmacıların gündeminde olan CD'ler ile ilgili ilk çalışma, 1891 yılında Villiers tarafından yayımlanmıştır. Villiers, Bacillus amylobacter ile 1000 g nişastadan 3 g kristalize madde sentezlemeyi başarmış ve kimyasal yapısının selüloza benzemesinden dolayı bu maddeyi selülozin olarak isimlendirmiştir. Bundan yaklaşık 12 yıl sonra, gıdalarda zehirlenmelere sebep olan bakteriler üzerine çalışmalar gerçekleştiren Schardinger, yayımladığı çalışmasında, nişastayı parçalayarak az miktarda iki farklı kristalize bileşik oluşturan ve ısıya son derece dayanıklı olan bazı mikroorganizmaların nişastayı çözerek kristalin formda ürünler oluşturduğunu rapor etmiştir. Kristalize dekstrinler üzerine çalışmalarına daha sonra da devam eden Schardinger, bu ürünlerin iyot çözeltileri eklendiğinde farklı iyot bileşikleri oluşturduklarını gözlemlemiş ve çalışmalarının sonunda ortaya çıkan bileşiği α-dekstrin olarak adlandırmıştır. Schardinger'in sentezlediği α ve β-dekstrin bileşikleri arasındaki temel fark ise, iyotla girdikleri reaksiyon sonucu ortaya çıkan renk farklılığı olmuştur. Kristalize α-dekstrinin oluşturduğu iyot kompleksi yaş haldeyken mavi, kuru haldeyken gri-ye-

şil renkte gözlemlenirken; β-dekstrinin oluşturduğu iyot kompleksi ise hem yaş hem de kuru haldeyken kırmızı-kahverengimsi bir renk vermiştir. Tüm bu çalışmalarından dolayı Schardinger, CD kimyasının fikir babası olarak gösterilmektedir (Çetintaş, 2022). 1930'lara gelindiğinde ise Freudenberg ve çalışma grubu, Schardinger'in keşfettiği bu moleküllerin maltoz üniteleri ve α-1,4 glikozit bağlarından oluşan halkalı yapılar olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu maddelerin homojen ve saf bir şekilde izole edilebilmesi için ilk düzeneği oluşturan ekip γ-CD'leri keşfederek daha büyük CD'lerin varlığını ispat etmişlerdir (Loftsson ve Duchêne, 2007).

1.1.CD'lerin Yapısı ve Özellikleri

CD'ler, nişasta ve türevlerinin siklodekstrin glikoziltransferaz enzimi ile parçalanmasıyla meydana gelen α(1-4) glikozidik bağlı, indirgen olmayan, halkalı maltooligosakkaritlerdir. Bu oligosakkaritler aynı zamanda, sikloamilozlar, siklomaltozlar ve Schardinger dekstrinleri olarak da adlandırılmaktadır. Her ne kadar 6 ila 12 glikopiranoz ünitesinden oluşan CD'lerin varlığı bilinmekte olsa da, endüstriyel olarak yalnızca α, β ve γ-CD olarak adlandırılan ve sırasıyla 6, 7 ve 8 glikopiranoz ünitesinden meydana gelen CD'ler üretilmekte ve kullanılmaktadır (Şekil 2) (Çetintaş, 2016).



Şekil 2: *α, β ve γ-CD'lerin kimyasal yapısı.*

CD'ler, kendilerine özgü konik yapılarının dış kısmının hidrofilik olması nedeniyle suda çözünebilen moleküllerdir (Soussa ve diğerleri, 2008). Ancak suda çözünebilen bu yapılar birçok organik çözücüde neredeyse hiç çözünmemektedir. Suda en fazla çözünen CD türü γ-CD' iken, en az çözünen CD türü ise β-CD'dir. Bu üç temel CD'e ait fiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: *CD'lerin fiziksel özellikleri (Çetintaş, 2022).*

	α-CD	**β-CD**	**γ-CD**
Glikoz ünitesi sayısı	6	7	8
Molekül ağırlığı (g.mol^{-1})	972	1135	1297
Dış çap (Å)	14.6	15.4	17.5
Kavite çapı (Å)	4.7-5.3	6.0-6.5	7.5-8.3
Yüksekliği (Å)	7.9	7.9	7.9
Kavite hacmi (Å)	174	262	427
Suda çözünürlük (g.L^{-1}, 25^{o}C)	128	18	256

CD'lerin sahip olduğu en önemli özellik, katı, sıvı ve gaz moleküller ile konuk-konak ilişkisi içerisinde inklüzyon kompleksleri oluşturabilme yeteneğidir. İnklüzyon kompleksi oluşumu, CD'lerin iç kısmında bulunan kaviteye, polar olmayan bir molekülün girmesiyle meydana gelmektedir. Polar olmayan moleküllerin kavitelere girmesi, temelde konuk moleküller ve CD kavitesinin duvarları arasındaki hidrofobik etkileşimler yoluyla meydana gelir. Ancak van der Waals ve dipol-dipol etkileşimleri gibi diğer kuvvetler de konuğun bağlanmasında etkin rol oynayabilmektedir (Cheirsilp ve Rakmai, 2016). Bu fenomenin başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi için, CD kavitesi ile konuk molekül arasındaki boyutsal bir uyum olması gereklidir. Böylece CD'lerin hidrofobik kavitesi, uygun boyuta sahip polar olmayan birçok molekül için inklüzyona elverişli bir ortam sağlamış olur (Çetintaş, 2016).

1.2. CD'lerin Uygulama Alanları

CD'ler, eşsiz fiziksel, kimyasal ve yapısal özellikleri nedeniyle yüzyıldan uzun bir süredir birçok alandan araştırmacının ilgi odağı haline gelmiştir. Bunun altında yatan en temel sebep ise, benzerine az rastlanan doğal yapıları gereği farklı moleküllerle inklüzyon kompleksi oluşturarak bu moleküllerin olumsuz özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilme yeteneğidir. Bu kompleksleşme yeteneği nedeniyle CD'ler, birçok endüstriyel üründe, teknolojide ve analitik yöntemde yaygın olarak kullanılmaktadır (Del Valle, 2004). İnklüzyon kompleksi oluşturabilme yetenekleri dışında ihmal edilebilir seviyedeki düşük toksisiteleri, CD'lerin farmasötik, gıda, çevre, tekstil ve kozmetik gibi çeşitli uygulamalarda tercih edilmelerinin başlıca sebepleri arasında yer almaktadır (Bezerra ve diğerleri, 2020; Jin, 2013; Salgın ve diğerleri, 2017). Bu bölümde CD temelli adsorbanların, atık sulardan boyar madde gideriminde-ki uygulamaları detaylı olarak incelenecektir.

2.SİKLODEKSTRİN TEMELLİ ADSORBANLAR İLE ATIK SULARDAN BOYA GİDERİM UYGULAMALARI

CD'ler birçok alanda olduğu gibi çevre alanında da, havadan, sudan ve topraktan geniş bir spektrumdaki kirleticilerin ayrıştırılması ve bertarafında kritik bir öneme sahiptir (Gao ve Wang, 1998). Farklı moleküllerle inklüzyon kompleksi oluşturabilme yeteneği ve geniş spesifik yüzey alanının bir sonucu olarak CD temelli adsorbanlar, oldukça yüksek bir adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Geleneksel adsorbanlarla kıyaslandıklarında, uygun maliyetleri, basit tasarımları ve spesifik afinitelerinden dolayı CD temelli adsorbanlar araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Nişastanın enzimatik olarak parçalanmasıyla kolayca elde edilebilen bu düşük maliyetli biyopolimerler, özünde toksik olmadıklarından ve biyolojik olarak parçalanabildiklerinden, literatürde "yeşil moleküller" olarak kabul görmektedir (Köse ve diğerleri, 2021). Bu yeşil moleküller her ne kadar hava ve toprak kirliliği çalışmalarında yoğun olarak kullanılsalar da, günümüzde en büyük ilgiyi atık sudan organik kirleticilerin uzaklaştırılması çalışmalarında görmektedir. Tüm bu endüstriyel CD'ler suda az ya da çok, bir şekilde çözündüklerinden, ayırma ve saflaştırma gibi işlemlerde tek başına kullanımları oldukça sınırlıdır (Salgın ve diğerleri, 2017; Morin-Crini ve Crini, 2013). Bu nedenle çapraz bağlanma, immobilizasyon ve kendi kendine montaj gibi işlemlerle CD temelli suda çözünmeyen adsorbanlar sentezlenmesi gerekmektedir (Liu ve diğerleri, 2020).

Çapraz bağlanma, moleküllerin birbirine çapraz bağlayıcı ajanlar ile bağlanarak çok daha kararlı moleküler yapılar elde etmeye yönelik reaksiyonları tanımlar. Bunlardan epiklorohidrin (EPI) yaklaşık 50 yılı aşkın bir süredir çapraz bağlayıcı ajan olarak kullanılmaktadır (Syeda ve diğerleri, 2022). Bu bağlamda bir grup araştırmacı, adsorban olarak kullanılmak üzere indirgenmiş grafen oksit (RGO) ile EPI çapraz bağlı β-CD'den oluşan yeni bir üçlü kompozit sentezlemiş ve Malakit Yeşili boyasının adsorpsiyonu için kullanmıştır. Elde ettikleri CD temelli kompozitin adsorpsiyon performansını sistematik olarak araştıran ekip, maksimum Malakit Yeşili adsorpsiyon miktarını 902.125 mg/g olarak belirlemiş ve gerçek atık sular için kompozitin adsorpsiyon kapasitesinin %60.25 olduğunu rapor etmiştir. Ayrıca çalışmada CD temelli bu kompozitin rejenerasyon sonrası tekrar etkili bir şekilde kullanılabilir olduğu ve bu yeni kompozitlerin atık sulardan Malakit Yeşili boyası giderimi uygulamalarında kritik bir rol oynayabileceği ifade edilmiştir (Rout ve Jena, 2022).

CD çapraz bağlı adsorbanlarda kullanılan bir diğer önemli çapraz bağlayıcı ajan ise etilendiamin tetraasetik asit (EDTA)'dir. Zhao ve arkadaşları çapraz bağlayıcı olarak EDTA ile β-CD'nin polikondenzasyon reaksiyonu yoluyla kolay ve yeşil bir yaklaşımla EDTA çapraz bağlı β-CD (EDTA-β-CD) adsorbanını sentezlemiş ve Metilen Mavisi, Safranin O, Kristal Menekşe gibi

katyonik boyaların adsorpsiyon performanslarını incelemiştir. Çalışmanın sonunda arştırmacılar, kolay ve yeşil üretimi, verimli adsorpsiyon performansı ve mükemmel yeniden kullanılabilirliğinden dolayı EDTA-β-CD'nin, bir arada bulunan toksik kirleticilerin aynı anda verimli bir şekilde arıtımında pratik uygulamalar için yüksek bir potansiyele sahip olduğunu bildirmiştir (Zhao ve diğerleri, 2015).

Yadav ve arkadaşlarının 2019 yılında yürüttüğü bir çalışmada ise hidrofilik ve hidrofobik boyaları aynı anda uzaklaştırabilen maleik anhidrit çapraz bağlı β-CD polimerine sahip manyetik bir nanoadsorban geliştirilmiştir. Optimum adsorpsiyon koşullarını değerlendirmek için konsantrasyon, adsorban dozajı, temas süresi, pH ve sıcaklık gibi çeşitli parametrelerin etkisini değerlendiren araştırmacılar, sentezledikleri bu süper-paramanyetik nanoadsorbanın manyetik ayırma işlemi ile ortamdan kolayca ayrılabildiğini ve %97,2 adsorpsiyon verimliliği ile Malakit Yeşili boyasını maksimum düzeyde giderdiğini rapor etmiştir. Farklı boya karışımlarında eş zamanlı adsorpsiyon üzerine çalışmalar yapan ekip, CD temelli bu adsorbanların ilginç bir şekilde rekabetçi bir adsorpsiyon performansı sergilediğini ifade etmiştir (Yadav ve diğerleri, 2019). Başka bir çalışmada ise Özmen ve Yılmaz, α ve β-CD'leri farklı çapraz bağlama ajanları kullanarak (4,4-metilen-bis-fenildiizosiyanat (MDI) ve heksametilendiizosiyanat (HMDI)) sentezlemiş ve Kongo Kırmızısı boyasının atık sulardan uzaklaştırılması için adsorban olarak aktif karbonla karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonunda araştırmacılar çözelti pH'ının adsorpsiyon üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu ve CD'ler çapraz bağlanarak hazırlanan adsorbanların aktif karbona kıyasla daha yüksek Kongo Kırmızısı adsorpsiyonu gerçekleştirdiğini rapor etmiştir (Özmen ve Yılmaz, 2007).

CD temelli adsorbanlar elde etmede bir diğer yaklaşım ise immobilizasyon, ya da katı bir desteğe tutturma yöntemidir. Arslan ve arkadaşları, silika bazlı bir adsorban geliştirmek için β-CD'i [3-(2,3-poksipropoksi)propil]trimetoksisilan ile modifiye ederek demir oksit manyetik nanopartikülleri üzerinde immobilize etmiştir. Hazırlanan bu β-CD immobilize manyetik nanopartiküller ile bazı kanserojen azo boyları uzaklaştırmak üzerine çalışan araştırmacılar, tüm bu boya türleri için CD temelli adsorbanların pH=3 ortamında %98 ve üzeri adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu bildirmiştir (Arslan ve diğerleri, 2013). Benzer şekilde başka bir çalışmada ise, sol-jel yöntemiyle mezo gözenekli silika üzerine yine β-CD immobilize edilerek, suda çözünmeyen gözenekli bir adsorban geliştirilmiş ve Alizarin Sarısı boyar maddesinin sulu ortamdan uzaklaştırılması için kullanılmıştır. Roik öncülüğündeki bu ekip mezo gözenekli silika yüzeyinde lokalize olan β-CD'e ait oligosakkarit makromoleküllerinin, Alizarin Sarısı boyasının nötr sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasına katkıda bulunduğunu kanıtlamıştır. Çalışmanın sonunda immobilize β-CD gruplarına sahip bu silika malzemelerin, adsorpsiyon, ayırma ve kontrollü salınım gibi süreçlerde

umut verici bir potansiyele sahip olduğu ifade edilmiştir (Roik ve diğerleri, 2017).

Kendi kendine montaj, bir malzemenin mevcut birimlerinin yüksek düzeyde düzenlenmiş desenlere ya da düzenli yapılara birleştirilmesi süreci olarak tanımlanır. Kovalent olmayan etkileşimler yoluyla oluşturulan bu yapılar ise, hem inorganik hem de organik moleküllere önemli özellikler kazandırır (Yadav ve diğerleri, 2020). Nie ve çalışma grubu, gözenekli yapıya sahip üç boyutlu β-CD-GO aerojel mikroküreleri (CD-GAM), dondurarak kastingle kombine edilmiş elektrospreyleme ve ardından kendiliğinden montaj yöntemi ile sentezlemiş ve anyonik boyaların gideriminde adsorban olarak incelemiştir. GO ve β-CD'nin kendi kendine montaj sonrası entegrasyonu sayesinde C-GAM'lar, Metilen Mavisi (439 mg/g) ile Rodamin B (388 mg/g) gibi anyonik boyalar ve Asit Kırmızısı 87 (234 mg/g) ile Metil Turuncusu (167 mg/g) gibi katyonik boyalar için 10 dakika gibi kısa bir sürede mükemmel adsorpsiyon yeteneği sergilemiştir. Ek olarak CD-GAM'ın, beş döngü sonunda %80'den fazla stabil rejeneratif adsorban kapasitesini koruduğu ve geniş spektrumdaki boyar maddelerin atık sulardan uzaklaştırılması için ideal bir seçim olduğu ifade edilmiştir (Nie ve diğerleri, 2021). Bir diğer çalışmada ise CD'ler ile adamantanla modifiye edilmiş poli akrilik asitten (PAA-Ad) yapılmış, kendiliğinden birleşen hidrojel malzemeler sentezlenerek boyar madde adsorpsiyonu denemeleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan supramoleküler hidrojellerin birbirine bağlı üç boyutlu gözenekli bir ağa yapısına sahip olduğunu gözlemleyen Hou ve arkadaşları, yapılan denemeler sonrası bu malzemelerin yüksek bir geri kazanım performansı gösterdiği belirtmiştir. Çalışmada hidrojellerin mekanik özelliklerinin, PAA-Ad konsantrasyonları değiştirilerek ayarlanabilir olduğu ve özellikle su saflaştırma proseslerinde üstün performans sergilediği ifade edilmiş olup; sonuçlar, hidrojellerin bisfenol A (BPA), 4-aminoazobenzen (N-Azo), Metilen Mavisi ve Rodamin B dahil olmak üzere kullanılan dört tipik zehirli organik boya molekülünün adsorpsiyonunda farklı mekanizmalara sahip olduğunu göstermiştir. CD temelli hidrojellerin N-Azo'yu inklüzyon kompleksi oluşturma yoluyla adsorbe ettiği, BPA'yı ise hem inklüzyon kompleksleşmesi hem de hidrojen bağı sinerjisi ile adsorbe ettiğini bildiren araştırmacılar, Metilen Mavisi ve Rodamin B boyar maddelerinin hidrojen bağı ve elektrostatik etkileşimler yoluyla adsorbe edildiğini rapor etmiştir (Hou ve diğerleri, 2019).

Yapılan çalışmalar CD temelli adsorbanların atık sulardan boyar madde gideriminde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle düşük suda çözünürlüğe sahip olan β-CD'nin, suda çözünmeyen adsorbanlar geliştirilmesinde diğer CD türlerine göre çok daha fazla tercih edildiği görülmektedir. Basit tekniklerle üretilebilen uygun maliyetli bir biyopolimer olmalarının yanı sıra, ihmal edilebilir seviyedeki toksisiteleri, geniş yüzey alanları ve hepsinden önemlisi birçok farklı molekül ile inklüzyon kompleksi

oluşturabilme yetenekleri, CD'leri atık su çalışmalarında etkili ve çevre dostu bir çözüm haline getirmektedir. CD temelli adsorbanların atık su arıtma uygulamalarında yakın gelecekte kendine daha geniş bir kullanım alanı bulması ve endüstriyel atık sulardan özellikle boyar madde gideriminde çok daha etkili bir rol oynaması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

Ahmed, J., Tiwari, B. K., Imam, S. H., & Rao, M. E. (Eds.). (2012). *Starch-based polymeric materials and nanocomposites: Chemistry, processing, and applications*. CRC Press.

Al-Ghouti, M. A., & Dib, S. S. (2020). Utilization of nano-olive stones in environmental remediation of methylene blue from water. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *18*, 63-77.

Arslan, M., Sayin, S., & Yilmaz, M. (2013). Removal of carcinogenic azo dyes from water by new cyclodextrin-immobilized iron oxide magnetic nanoparticles. *Water, Air, & Soil Pollution*, *224*, 1-9.

Bezerra, F. M., Lis, M. J., Firmino, H. B., Dias da Silva, J. G., Curto Valle, R. D. C. S., Borges Valle, J. A., ... & Tessaro, A. L. (2020). The role of β-cyclodextrin in the textile industry. *Molecules*, *25*(16), 3624.

Cheirsilp, B., & Rakmai, J. (2016). Inclusion complex formation of cyclodextrin with its guest and their applications. *Biol Eng Med*, *2*(1), 1-6.

Crini, G. (2020). The contribution of Franz Schardinger to cyclodextrins: a tribute on the occasion of the centenary of his death. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 97(1), 19-28.

Çetinkaya, S., Eyupoglu, V., Çetintaş, H. İ., Yenidünya, A. F., Kebabcı, Ö., & Tüzün, B. (2023b). Removal of Erythrosine B dye from wastewater by Penicillium italicum: experimental, DFT, and molecular docking studies. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 1-12.

Çetinkaya, S., Kaya, S., Aksu, A., Çetintaş, H. İ., Jalbani, N. S., Erkan, S., & Marzouki, R. (2023a). Equilibrium and DFT modeling studies for the biosorption of Safranin O dye from water samples using Bacillus subtilis biosorbent. *Journal of Molecular Structure*, *1276*, 134761.

Çetintaş, H. İ. (2016). *Pmda-çapraz bağlı nanosüngerlerle ketoprofenin inklüzyon komplekslerinin sentezi* (Tez no. 457702) [Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi].

Çetintaş, H. İ. (2022). *Biyolojik temelli metal organik kafes yapıların sentezi, karakterizasyonu ve ilaç taşıyıcı sistem olarak uygulaması* (Tez no. 779746) [Doktora Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi].

Da Silva Alves, D. C., Healy, B., Pinto, L. A. D. A., Cadaval Jr, T. R. S. A., & Breslin, C. B. (2021). Recent developments in chitosan-based adsorbents for the removal of pollutants from aqueous environments. *Molecules*, *26*(3), 594.

Del Valle, E. M. (2004). Cyclodextrins and their uses: a review. *Process biochemistry*, *39*(9), 1033-1046.

Gao, S., and Wang, L. (1998). Application of cyclodextrin in environmental science. *Huanjing Kexue Jinzhan*, 6, 80-86.

Gleick, P. H. (1996). Basic water requirements for human activities: Meeting basic needs. *Water international*, *21*(2), 83-92.

Hou, N., Wang, R., Geng, R., Wang, F., Jiao, T., Zhang, L., ... & Peng, Q. (2019). Facile preparation of self-assembled hydrogels constructed from poly-cyclodextrin and poly-adamantane as highly selective adsorbents for wastewater treatment. *Soft Matter*, *15*(30), 6097-6106.

Jin, Z. Y. (2013). *Cyclodextrin chemistry: preparation and application*. World Scientific.

Köse, K., Tüysüz, M., Aksüt, D., and Uzun, L. (2021). Modification of cyclodextrin and use in environmental applications. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-28.

Liu, Q., Zhou, Y., Lu, J., & Zhou, Y. (2020). Novel cyclodextrin-based adsorbents for removing pollutants from wastewater: A critical review. *Chemosphere*, *241*, 125043.

Loftsson, T., & Duchene, D. (2007). Cyclodextrins and their pharmaceutical applications. *International journal of pharmaceutics*, *329*(1-2), 1-11.

Morin-Crini, N., and Crini, G. (2013). Environmental applications of waterinsoluble β-cyclodextrin–epichlorohydrin polymers. *Progress in Polymer Science*, 38(2), 344-368.

Nie, Z. J., Guo, Q. F., Xia, H., Song, M. M., Qiu, Z. J., Fan, S. T., ... & Li, B. J. (2021). Cyclodextrin self-assembled graphene oxide aerogel microspheres as broad-spectrum adsorbent for removing dyes and organic micropollutants from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(2), 104749.

Ozmen, E. Y., & Yilmaz, M. (2007). Use of β-cyclodextrin and starch based polymers for sorption of Congo red from aqueous solutions. *Journal of hazardous materials*, *148*(1-2), 303-310.

Roik, N. V., Belyakova, L. A., Trofymchuk, I. M., Dziazko, M. O., & Oranska, O. I. (2017). Mesoporous silicas with covalently immobilized β-cyclodextrin moieties: synthesis, structure, and sorption properties. *Journal of Nanoparticle Research*, *19*, 1-16.

Rout, D. R., & Jena, H. M. (2022). Efficient adsorption of malachite green dye using novel reduced graphene oxide/β-cyclodextrin epichlorohydrin composite: batch and fixed-bed studies. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-19.

Salgın, S., Salgın, U., & Vatansever, Ö. (2017). Synthesis and Characterization of β-Cyclodextrin Nanosponge and Its Application for the Removal of p-Nitrophenol from Water. *CLEAN–Soil, Air, Water*, *45*(10), 1500837.

Schweitzer, L., & Noblet, J. (2018). Water contamination and pollution. In *Green chemistry* (pp. 261-290). Elsevier.

Syeda, S. E. Z., Nowacka, D., Khan, M. S., & Skwierawska, A. M. (2022). Recent Advancements in Cyclodextrin-Based Adsorbents for the Removal of Hazardous Pollutants from Waters. *Polymers*, *14*(12), 2341.

Tian, B., Hua, S., Tian, Y., & Liu, J. (2021). Cyclodextrin-based adsorbents for the removal of pollutants from wastewater: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 1317-1340.

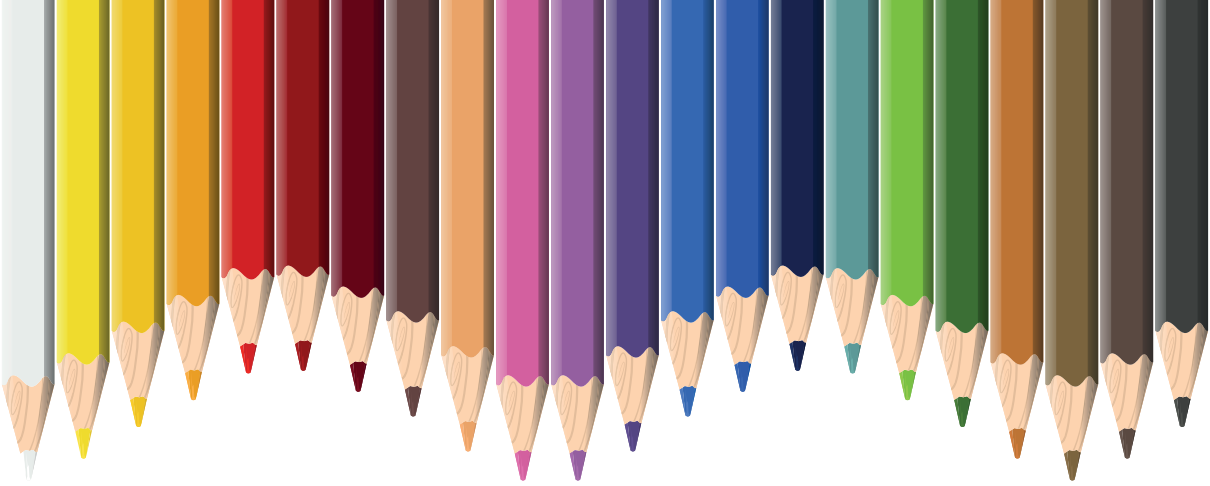
Tran, H. N., You, S. J., Hosseini-Bandegharaei, A., & Chao, H. P. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: a critical review. *Water research*, *120*, 88-116.

Wang, W., Gao, H., Jin, S., Li, R., & Na, G. (2019). The ecotoxicological effects of microplastics on aquatic food web, from primary producer to human: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*, *173*, 110-117.

Yadav, M., Das, M., Savani, C., Thakore, S., & Jadeja, R. (2019). Maleic anhydride cross-linked β-cyclodextrin-conjugated magnetic nanoadsorbent: an ecofriendly approach for simultaneous adsorption of hydrophilic and hydrophobic dyes. *ACS omega*, *4*(7), 11993-12003.

Yadav, S., Sharma, A. K., & Kumar, P. (2020). Nanoscale self-assembly for therapeutic delivery. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *8*, 127.

Zhao, F., Repo, E., Yin, D., Meng, Y., Jafari, S., & Sillanpää, M. (2015). EDTA-cross-linked β-cyclodextrin: an environmentally friendly bifunctional adsorbent for simultaneous adsorption of metals and cationic dyes. *Environmental Science & Technology*, *49*(17), 10570-10580.



Bölüm 18

MİKROENKAPSÜLASYON: TEKNİKLER, KULLANILAN YÖNTEMLER VE SÜT ENDÜSTRİSİNDEKİ DURUMU

Özlem AYDIN[1]

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü ORCID ID: 0000-0002-5645-3792 ozlem.aydin@ahievran.edu.tr

1.GİRİŞ:

Mikroenkapsülasyon, katı, sıvı veya gaz halinde olan gıda bileşenlerinin, enzimlerin, hücre ve diğer maddelerin, mikroorganizmaların, ilaçların kısaca aktif bileşenlerin kontrollü oranlarda, protein veya karbonhidrat esaslı veya sentetik polimerik bir kaplama materyali ile paketlenmesi olarak ifade edilmektedir (Anal ve Singh, 2007). Burada temel amaç; gıda bileşenlerini, ilaçları ve/veya mikroorganizmaları kötü çevre koşullarından korumak, dayanıklılığını arttırmak, kontrollü olarak salımını gerçekleştirmektir (Açu vd., 2014).

Bir immobilizasyon tekniği olan mikroenkapsülasyonda gıda bileşenleri, enzim veya hücreler polimer adı verilen matriksler içerisinde tutuklanmaktadırlar (Özcan ve Altun, 2013a). Burada mikroenkapsüllenen materyal çekirdek, iç faz veya dolgu olarak isimlendirilmekte olup, tutuklama işleminde kullanılan enkapsülasyon materyali ise kaplama materyali veya duvar materyali olarak isim almaktadır (Kınık vd., 2003).

Enkapsülasyon teknikleri gıda, kimya, ziraat, gibi alanlarda yakın zaman içinde hızla yaygınlaşmaya başlamıştır. Özellikle gıdalarda mikroenkapsülasyon tekniği çok yaygınlaşmıştır. Gıda bileşenleri, probiyotikler, fenolik bileşikler, aroma bileşenleri koruma amacıyla mikroenkapsülasyona tabi tutulmaktadır. Ziraat alanında ise kimyasal ilaçların etkisini azaltmak ve ortadan kaldırabilmek amacıyla biyopestisitler enkapsüle edilerek kullanılmaktadır. Böylelikle işlem süresince biyopestisitlerin etkinliği düşmeden ve sabit koşullarda zararlılarla mücadele edilebilmektedir.

Kontrollü salım sistemleri 1980'den itibaren özellikle eczacılık alanında kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan ilacın yan etkilerini ortadan kaldırmak, hedeflenen doku dışında başka bölgelere gitmesini önlemek, ilacın stabilitesini korumak için tercih edilirler. Ayrıca, kan dolaşımı olmayan bölgelere kan yoluyla ilacın ulaşması mümkün olamadığından lokal ilaç tedavisi her zaman daha çok tercih edilmektedir. En yaygın kullanılanları ise deri hastalıkları ile kıkırdak hastalıklarıdır. Deri için transdermal adı verilen salım sistemleri kullanılırken, kıkırdak için ise direkt ekleme ilaç verilmesi yoluyla intraartiküler enjeksiyon yapılarak gerçekleşmektedir. Kullanılacak ilacın tedavi esnasında var olan etkinliğini korumak ve doz ayarlamasını sadece bir kere yapmak kontrollü salım sayesinde mümkün olmaktadır. İlacın kandaki seviyesi tedavi boyunca aynı seviyede tutulmuş olunacağından, geleneksel tedavi sırasında oluşan kandaki ilaç seviyesinin sık değişmesine bağlı olarak ortaya çıkan değişimlerin ve olumsuzlukların önlenmesi sağlanacaktır.

Antibiyotikler ise çok yaygın kullanım alanları ve sahip oldukları diğer farklı tedavi etkinlikleri sebebiyle en çok enkapsüle edilen aktif bileşenlerdir. Enkapsülasyon ile antibiyotiğin yan etkileri ortadan kaldırılmış olunup sadece tedavi için gerekli bölgeye verilmesini sağlanır. İlgili bölgeye taşınması

esnasında sağlıklı bölgede aktivitesini göstermeden ve de stabil formda taşınması mümkün olabilmektedir.

Mikroenkapsülasyonun Faydaları:

Mikrokapsüllerin eldesi ile pek çok olumlu kazanç elde etmek mümkündür. Bunların en önemlilerini sıralamak istersek:

- ✓ Depolama sırasındaki tat ve koku maddeleri kayıplarını önlemek.
- ✓ Gıdaların raf ömrünü, besin değerini artırmak.
- ✓ Olgunlaşma sürelerini kısaltmak.
- ✓ Kırılgan ve çevresel faktörlerden korunması gereken bazı gıda ve gıda bileşenleri (vitaminler, çoklu doymamış yağ asitleri, aromalar vb.)
- ✓ İlaçların ve probiyotiklerin sindirim sisteminden zarar görmeden hedeflenen organa gitmesini sağlamak ve etkinliğini artırmak.
- ✓ Hassas bileşenler, örneğin aromalar arasında meydana gelebilecek arzu edilmeyen etkileşimler ile tat ve koku değişimlerini engellemek (Açu vd., 2014).

2. TARİHÇESİ

Enkapsülasyon teknolojisi 40-50 yıl öncesine dayanmaktadır ve araştırmalara bakıldığı zaman İsrail'in başı çektiği görülmektedir. Ancak mikroenkapsülasyon yöntemiyle gıda bileşenleri üreten firmalar genellikle ABD ve İngiltere kökenlidir. İlk olarak 1932 yılında bir İngiliz şirketi olan A. Boake, Roberts Co, Ltd. kaplama materyali olarak gum arabic kullanmış ve püskürterek kurutma tekniği ile elde ettiği toz ile gıdalarda ilk flavor tozu üretenlerden olmuştur. Daha sonra bu yöntem gıda ve içecek sanayisinde kullanılan en önemli uygulamalardan biri olmuştur (Gökmen vd., 2012).

Mikroenkapsülantlar, polisakkaridler, lipozomlar, sentetik polimerler vb. gibi çeşitli malzemelerden üretilirler. Taşıyıcıların doğası ve matriksi çok çeşitli malzemelerden, örneğin polisakkaridler, liposomlar, sentetik polimerler arasından genel olarak güvenilir (GRAS) farmasötik veya gıda endüstrisi malzeme listesi arasından uygulamanın ihtiyaçlarını hem de düzenleyici talepleri karşılayacak şekilde (örneğin biyobozunurluk) seçilir. (D'Emanuele ve diğ., 2004; Kozubek ve diğ., 2001; Lian ve Ho, 2001; Liu ve Frechet, 1999; Medina ve diğ., 2004; Nafee ve diğ., 2007; Stevanovic´ ve diğ., 2007a,b; Yoo, 2006; Rados, 2004).

Antibiyotikler yaşamımızda önemli bir yer teşkil etmektedirler. Antibiyotikler sadece insanlarda değil, koyunlarda, keçilerde ve hatta buzağılarda da enfeksiyon tedavisinde kullanılmaktadırlar. Antimikrobiyel özellikleri dışında sahip oldukları başka etkiler ve özellikler için de kullanılmaktadır.

Bazı antibiyotikler bakteri enfeksiyonuna karşı kullanıldığı gibi diğer taraftan enfeksiyon dışı hastalıklara karşı da kullanılabilmektedir. Bunlar, deri hastalıkları, eklem hastalıkları ve dişeti hastalıkları olup, antibiyotiklerin başka özellikleri sayesinde bu hastalıklar tedavi edilebilmektedir. (Perkins ve Heard, 1999; Banning ve Heard, 2001). Tetrasiklin grubu antibiyotikler bu tür özellikleri olan antibiyotiklerdir. Bu özelliklerin başında matriks metalloproteinaz inhibitörlüğü gelmektedir (Choi ve ark, 2004). Ayrıca stabiliteleri de oldukça yüksektir. (Bokor-Bratic ve Brkanic, 2000)

Antibiyotikler bazı gıda zehirlenmesi vakalarında da kullanılmaktadır. Gıdalar enfeksiyon kaynağı olabilecek mikroorganizmaları içerdiğinde, bu mikroorganizmalar çoğu kez barsak florasında gelişimlerini sürdürdüklerinden, tedavi amaçlı kullanılabilecek antibiyotiklerin de barsak florasına direkt iletilmeleri gerekmektedir. Dolayısıyla barsak florasına gitmeden önce vücudun başka bölgelerine gitmesi önlenmelidir. Bu da enkapsülasyonla dış etkilerden korunmuş yapılarla mümkün olabilmektedir. Sadece barsak florası değil, aynı zamanda, vücudun başka bölgeleri için lokal tedavi gerektiğinde, örneğin deri yoluyla (transdermal) veya eklem içi enjeksiyon (intaartikular) yoluyla ilacın yan etkileri önlenir, ilacın stabilitesi korunur ve de ilacın kandaki düzeyi istenen seviyede hiç değişmeksizin tedavi boyunca aynı tutulmuş olunur. Buna da kontrollü salım denilmektedir.

Enkapsülasyon teknolojisi son yıllarda hızlı gelişme kaydetmekte olup, gıda, kimya, ziraat, yem, tıp, eczacılık, veterinerlik ve biyoteknoloji alanlarında uygulanmaktadır (Gökmen ve ark, 2012). Özellikle eczacılık alanında kontrollü salım sistemleri 1980'den günümüze hızla gelişme göstermektedir (Burger ve ark, 1985; Dhanaraju ve ark, 2006; Jiang ve ark, 2011). Burada hedeflenen, enkapsüle edilen malzemenin stabilitesini korumak, bileşenlerin yavaş salımını sağlamak suretiyle özelliklerini geliştirmektir. Yararlı birçok özelliğinden dolayı gıdalarda mikroenkapsüle probiyotiklerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Probiyotiklerin dayanımı mikroenkapsülasyon yönteminin kullanımıyla daha iyi hale gelmiştir (Ünal ve Erginkaya, 2010).

3. KULLANILAN KAPLAMA MATERYALLERİ

Enkapsüle edilen aktif bileşenin istenilen özelliklere sahip olabilmesi için uygun kaplama materyali kullanılmalıdır. Bu sebeple de uygun ve işe yarayacak özellikte doğru kaplama materyali seçilmelidir. Kaplama materyallerinin ve aktif bileşenin özelliklerini bilmek önemlidir. Buna ilaveten salım profili için de doğru kaplama materyali seçmek önemlidir. Aşağıdaki özelliklere bakarak aktif bileşenin en uygun malzeme ile enkapsüle edilmesi mümkün olacaktır. Aşağıdaki özelliklerine bakılarak kaplama materyalleri seçilmelidir.

Özellikler şu şekilde sınıflandırılabilir: (Koç vd., 2010).

- Reolojik özellikler
- Emülsiyon ve dispersiyon özellikleri
- Emülsiyon stabilitesi
- Reaksiyon
- Çözünürlük
- Maliyet
- Çekirdek materyali kaplayabilme ve koruyabilme özelliği

Emülsiyon stabilitesi yüksek, ancak maliyeti düşük, istediğimiz çözücüde çözünebilen, hiçbir şekilde reaksiyona girmeyen ve çekirdek materyali koruyabilen kaplama malzemesi tercih edilmelidir. Ayrıca çekirdek materyal ile reaksiyona girmesi kabul edilmez. Kaplama işlemi sırasında çekirdek materyali kaplamalı ve depolama sırasında çekirdek materyali koruyabilmelidir.

Bütün bu özellikleri aynı anda içeren ideal bir kaplama materyali ne yazık ki olmadığından başka çalışmalar yürütülmektedir. Bu yüzden de pratikte kaplama materyalleri, başka bir kaplama materyali ile, oksijen tüketiciler, antioksidanlar, çelat ajanları ve biyosürfaktanlar gibi maddelerle birlikte kullanılarak birbirlerinin avantaj ve dezavantajlarını dengelemeleri mümkün olmaktadır (Açu vd., 2014).

3.1. Karbonhidratlar

Karbonhidratlar özellikle gıda katkı maddelerinin püskürterek kurutma yöntemi ile enkapsüle edilmesinde kullanılmaktadırlar. Nişasta, maltodekstrin ve mısır şurubunun aroma maddelerinin enkapsülasyonunda kullanım nedenleri; çeşitliliği, maliyetinin düşük olması ve geniş kullanım olanakları sağlamalarıdır (Aloğlu ve Öner, 2010).

Karragenan ve aljinat en yaygın kullanılanlarıdır. Kırmızı alglerin hücre duvarlarından elde edilen bir polisakkarit ve kahverengi alglerin hücre duvarlarından elde edilen bir karbonhidrat olduklarından, probiyotik bakterilerin enkapsülasyonunda en çok tercih edilip kullanılan kaplama materyallerindendir. Probiyotik bakterilerin enkapsülasyonunda kullanılan diğerleri; jellan ve ksantan zamkı, kitosan, nişasta ve süt proteinleri şeklinde sıralanabilir (Özcan ve Altun, 2013b).

3.2. Gamlar

Tatları çok az veya hiç olmayan gamlar ve kıvam verici maddeler gıdaların tat ve aromalarında etkilidirler. Akasya gamının çözünürlülüğü yüksektir, viskozitesi düşüktür ve emülsiyon yapma özelliği vardır. Bu özellikler onu enkapsülasyon teknolojisinde aranan kaplama materyali yapmaktadır. Ancak pahalı olması nedeniyle kullanımı sınırlıdır (Aloğlu ve Öner, 2010).

3.3. Proteinler

Enkapsülasyon teknolojisinde kullanılan proteinlerden bazıları sodyum kazeinat, soya protein izolatlarıdır. Çeşitlilik, suda çözünen ve çözünmeyen grupların birlikte olabilmesi, etkileşime girme, yüksek molekül ağırlıkları, çözünürlük, viskozite ve emülsiyon yapma özellikleri enkapsülasyonda kullanılma sebeplerindendir (Aloğlu ve Öner, 2010).

Peyniraltı suyu (PAS) proteinleri de mikroenkapsülasyon teknolojisinde istenen özellikleri taşıdığından kaplama materyali olarak kullanılabilmektedir. Özellikle uçucu ve uçucu olmayan bileşiklerin enkapsüle edilmesinde çok iyi özellik göstermektedirler. Ayrıca lipit enkapsüle etmekte kullanılan PAS proteinleri oksidasyona karşı koruma sağlamaktadır (Aloğlu ve Öner, 2010).

Isıl-tersinir jel yapıcı bir protein olan jelatin, probiyotik bakterilerin enkapsülasyonunda tek başına kullanılabileceği gibi diğer bileşiklerle kombinasyon halinde de kullanılabilmektedir. Örneğin jellan sakızı gibi polisakkaritlerle birlikte kullanılma özelliğine sahiptir (Özcan ve Altun, 2013b).

3.4. Diğer kaplama materyalleri

Mikroenkapsülasyon teknolojisinde kullanılan pek çok kaplama materyali bulunmaktadır. İhtiyaç durumu ve özelliklerine göre ikame olarak da tercih edilebilirler (Aloğlu ve Öner, 2010):

- Selülozlar (karboksimetilselüloz, metil selüloz, etilselüloz, nitroselüloz, asetilselüloz, selüloz asetat-fitalat, selüloz asetat-bütilat-fitalat),
- Lipitler (mumlar, parafin, tristearin, stearik asit, monogliseritler, digliseritler, balmumu)
- İnorganik maddeler (kalsiyum sülfat, silikatlar, kil)
- Lipozomlar
- Aroma maddelerinin ve enzimlerin enkapsülasyonunda kullanılan süt yağı peynirde, aroma maddelerinin ön maddesi olup aromayı taşımaktadır. Süt yağı ile enkapsüle edilmiş bileşenlerin az yağlı peynirlerde kullanılması bu peynirlere tam yağlı lezzeti kazandırmaktadır (Aloğlu ve Öner, 2010).
- Sentetik polimerlerler:

Salım sistemlerinde kullanılabilecek çok çeşitli miktarda polimerler mevcuttur. PCL, PLGA, PLA, PHBV, kitosan, doğal ve modifiye polisakkaritler, proteinler vb. bu amaçla yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar (Nair ve Laurencin, 2006; Gunatillake ve Adhikari, 2003; Dhandayuthapani ve ark, 2011; Ünal ve Erginkaya, 2010). Polikaprolakton (PCL), Polilaktid (PLA) ve Poli(laktid-ko-glikolit) (PLGA) polimerleri salım sistemlerinde en yaygın kullanılan polimerdir. Ancak son zamanlarda bu polimerler kullanılarak ke-

mik implantlarının geliştirilmesi de büyük ilgi görmüştür. Bu polimerlerin yeni dozaj formlarının araştırılması ise günümüzün yeni trendi olmuştur.

4. MİKROENKAPSÜLASYON TEKNİKLERİ

Öncelikle kaplanacak malzemeye göre polimer seçimi yapılır. Boyut için ise karıştırma hızı değiştirilerek damlacık boyutu ayarlaması yapılır. Karıştırma hızı arttıkça emülsiyondaki damlacıklar kırılmak suretiyle küçülür ve oluşan parçacıkların boyutu küçülür (Aishwarya ve ark, 2008; Wang ve ark, 2008). Bazı sistemler için boyut küçültme özellikle önem arz etmektedir. Eklem içi enjeksiyonlarda parçacık boyutu özel olarak ayarlanmaktadır. Ayrıca salım miktarının artması da parçacık boyutu ile ilgilidir. Alan-hacim ilişkisi de bu noktayı özellikle vurgulamaktadır. Boyut küçüldükçe salınan ilaç miktarı da artar (Jeong ve ark, 2003). Seçilen polimerin molekül ağırlığı da enkapsülasyon parçacıklarının boyutunu belirleyen diğer bir faktördür. Molekül ağırlığı arttıkça parçacık boyutu da artar (Jeong ve ark, 2003). O yüzden de oluşması istenilen parçacıklar için molekül ağırlığı faktörünü de göz önünde tutmak gerekir.

Her salım sisteminin profilini belirleyen yegâne özellikler kullanılan polimerden kaynaklanan özellikler ve ilaç/biyoaktif ajanlardan kaynaklanan özellikler olacak şekilde ikiye ayrılmaktadır. Kullanılan polimerden kaynaklanan özellikler molekül ağırlığı, kristallik, hidrofob/hidrofil olma, biyobozunma kinetiği iken, ilaç/biyoaktif ajanlardan kaynaklanan özellikler ise; çözünürlük, molekül ağırlığı, fiziksel durumu ve stabilitesidir. Bunlara ek olarak, ilaç yükleme verimi, polimer-ilaç etkileşimleri, boyut dağılımı, gözeneklilik ve sistemin içyapısı da salım davranışını etkilerler (Jeong ve ark, 2003; Freiberg and Zhu, 2004; Wang ve ark, 2009). Enkapsülasyon teknikleri genellikle kurutma esasına dayanmaktadır. Bunun nedeni enkapsüle edilen bileşiklerin çoğunlukla sıvı halde olmalarıdır. (Açu vd., 2014).

4.1. Püskürterek kurutma yöntemi

Bu yöntem su miktarının azaltılması ile ürünün mikrobiyolojik olarak stabile hale gelmesi, kimyasal bozulmaların önlenmesi, depolama ve taşımada kolaylık (maliyetlerinin azaltılması) ve ürünlerin özelliklerinin korunması amacıyla gıdalarda sık sık kullanılmaktadır (Özcan ve Altun, 2013a). Gıda sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılan bu yöntemde tekdüze bir işlem sağlanamaması ve partikül büyüklüğünün her zaman kontrol edilememesi gibi dezavantajlar da bulunmaktadır (Açu vd., 2014).

Yöntemde kullanılan kaplama materyalleri; jelatin, modifiye nişasta, dekstrin ve jelleşme özelliği göstermeyen hidrokolloidler olabilmektedir. Yağ, aroma maddeleri ve antioksidanlar gibi gıda maddelerinin enkapsülasyonunda bu yöntem kullanılabilmektedir. Ayrıca sıvı ürünlerin toz forma dönüştürülmesinde de kullanılabilen bir yöntemdir (Açu vd., 2014).

4.2. Püskürtmeli soğutma/serinletme yöntemi

Lipitlerin erime noktası esasına dayanan sistemde önemli olan sıcaklık olup püskürtmeli soğutma ile serinletme arasındaki temel farktır. Püskürtmeli serinletme yönteminde sıcaklık 34-42°C arasındadır. Püskürtmeli soğutmada ise sıcaklık daha yüksektir. Püskürtmeli serinletmede kesikli ve sürekli prosesler bulunur ve her ikisinde de verim yüksektir (Açu vd., 2014).

4.3. Ekstrüzyon yöntemi

Düşük sıcaklıkta uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem; daha çok uçucu ve ısı stabilitesi düşük oksidasyona yatkın tat ve aroma bileşenlerine daha uzun bir raf ömrü sağlaması sebebiyle tercih edilir. Ekstrüde uçucu yağların raf ömrünün püskürterek kurutma yapılan uçucu yağlara oranla 5 kat daha fazla olduğu bildirilmektedir (Özcan ve Altun, 2013a; Açu vd., 2014).

Yöntemde daha çok aljinat ve karragenan kullanılmaktadır. Ana prensibi; çekirdek materyal bulunan çözeltinin küçük açıklıklardan yüksek basınçla geçirilmesidir. Ucuz, basit ve verimli bir yöntem olan ekstrüzyon yönteminin teknolojisi zararlı çözücüler içermemektedir. Yavaş enkapsülasyon yüzünden büyük ölçekli üretimlerde kullanımı tercih edilmemektedir (Özcan ve Altun, 2013a).

4.4. Püskürterek dondurma yöntemi

Kaplama materyali olarak daha çok mumlar, yağ asitleri, polimerler ve monomerler kullanılmaktadır ve bu yöntem ile elde edilen ürün püskürterek kurutulmuş üründen daha geniş yüzey alanına sahiptir. Enerji kullanımının fazla olması ve işlemin uzun sürmesi gibi nedenlerle püskürterek kurutmaya göre daha yüksek maliyet gerektirmektedir. Öte yandan aroma kaybının çok düşük olması, elde edilen ürünün özelliklerinin iyi olması ve minimum kayıplar gibi avantajları bulunmaktadır (Özcan ve Altun, 2013a).

4.5. Emülsifikasyon yöntemi

Süreksiz ve sürekli faz arasındaki ilişkiyi temel alan bu yöntemde kapsülleme amacıyla aljinat, pektin ve karragenan gibi hidrokolloidler kullanılmaktadır. Uygulanması kolaydır ve mikroorganizmaların enkapsülasyonunda kullanıldığında yüksek oranda canlılığın korunabildiği bilinmektedir. Yöntemde polimer süspansiyonu (süreksiz faz) bitkisel yağa (sürekli faz) eklenmektedir. Bu karışım daha sonra homojen hale getirilmektedir. Böylece yağ içinde su emülsiyonu oluşturulmuştur. Daha sonra suda çözünür olan polimerin yağ fazı içinde küçük jeller oluşturması için çözünmez hale getirilmesi gerekmektedir (Özcan ve Altun, 2013a). Burada emülsifiye edilmiş tanecikler elde edilmektedir.

4.6. Koaservasyon/faz ayrımı yöntemi

Polimer özellikteki çözeltiden kaplama materyaline ait sıvı fazın ayrılması ve çekirdek partiküllerinin çevresinde uniform bir tabaka halinde tutulmasını içeren bu yöntemde; kaplama materyali olarak suda çözünen polimerler kullanılmaktadır. Mikrokapsüller, elde edildikten sonra filtrasyon ve santrifügasyon gibi ayırma teknikleriyle ortamdan ayrılırlar ve standart bir teknikle tek tek kurutulmaktadırlar (Özcan ve Altun, 2013a). Yöntemde agregat oluşumu yani kümeleşmeleri sağlayabilmek için sıcaklık, pH ve çekirdek-kaplama materyali gibi sistem özellikleri değiştirilebilmektedir (Açu vd., 2014).

4.7. Kompleks oluşturma yöntemi

Bu yöntemde enkapsülasyon ajanı olarak siklodekstrin kullanılmaktadır. Bu madde hidrofobik moleküller ile stabil kompleksler oluşturmaktadır. Oldukça kararlı bir yapıya sahip olan bu kompleksin oluşabilmesi için suya ihtiyaç duyulmaktadır. Siklodekstrinler çöktürme ile çözeltiden uzaklaştırılır ve filtrasyon ile ortamdan alınarak kurutulur (Açu vd., 2014).

4.8. Lipozom dağıtma yöntemi

Lipozomlar; fosfolipitlerin suda dağılması sırasında kendiliğinden oluşan küre şeklindeki kabarcıklardır. Gıda endüstrisinde daha çok enzim, vitamin ve antioksidanların stabilitesini artırmak için kullanılmaktadırlar. Lipozomlar, hidrofilik ve hidrofobik molekülleri tutma özellikleri sayesinde tarım ve beslenme endüstrisinde kullanılabilmektedirler. Bu yöntemle enkapsüle edilen materyalin uygun zamana kadar saklanabilmesi ve salımlarının kontrol edilebilir olması yöntemin avantajlarındandır. Ayrıca tadın stabilize edilmesinde ve depolama stabilitesinin artırılmasında da etkili bir enkapsülasyon yöntemidir. Lipozomların sağlığa yararlı bileşikleri enkapsüle ederek gıdaların biyolojik yararlılıklarını ve besinsel özelliklerini artırdığı da bildirilmektedir (Açu vd., 2014; Özcan ve Altun, 2013a).

5.SÜT ÜRÜNLERİNDE MİKROENKAPSÜLASYON

Probiyotikler, insanın doğal bağırsak mikrobiyatasını olumlu yönde etkileyerek insan sağlığı üzerinde yararlı etkilere sebep olan mikrobiyel canlılardır (Özcan ve Altun, 2013b). Probiyotik bakterilerin istenilen faydalı etkiyi gösterebilmesi için $>10^8$ kob/ml den daha çok sayıda vücuda alınması gerekmektedir. Ayrıca canlılıklarını kaybetmemeleri de çok önemlidir. Laktik asit bakterileri probiyotik süt ürünleri üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle "*Lactobacillus acidophilus*" ve "*Bifidobacterium bifidum*" en çok kullanılan probiyotik bakterilerdir. Enkapsülasyon tekniğinin probiyotiklerin canlı kalma sürelerini uzattığı tespit edilmiştir. Bu yöntemde temel amaç ya hücreyi yüksek konsantrasyonda tutmak ya da çevredeki yüksek asitlik, safra tuzları gibi olumsuz etkilerden korumaktır. Böylece bakterinin bağırsak

ortamına ulaşması sağlanabilecektir. Kullanılan kaplama materyalinin toksik olmamasının ve ucuz olmasının yanı sıra yüksek hücre yükünü kaldırabilir nitelikte olması da istenmektedir (Açu vd., 2014).

5.1.Peynir

Peynirlerin hızlı olgunlaştırılması özellikle depolamanın sınırlı olduğu zamanlarda üretim kapasitesini artırmak için çok önemli olmaktadır. Bu olgunlaştırma süresini kısaltabilmek için kullanılan yöntemlerdeki temel prensip; tat ve aroma oluşturan bakterilerin ya da enzimlerin biyokimyasal değişimlerini hızlandırmaktır (Açu vd., 2014).

Peynirlerde olgunlaşma sırasında meydana gelen değişimlerin esas kaynakları endopeptidaz ve ekzopeptidaz olarak adlandırılan mikrobiyal enzimlerdir. Peynirlerde enkapsülasyonda asıl amaç istenilen tat ve aroma gelişiminin sağlanabilmesidir. Bu ürünler pıhtılaşmadan önce ilave edilmektedirler. Böylece enzim ya da starter kültürün doğrudan peynir ile teması engellemekte ve bu şekilde meydana gelebilecek olumsuzluklar önlenebilmektedir (Açu vd., 2014). Ayrıca bakterilerin pH ve sıcaklık dayanımları gelişmektedir (Özcan ve Altun, 2013b). Olgunlaşma süresinin ve depolama masraflarının azaltılabilmesi amacıyla yapılan araştırmalarda, bu iki tip enzim mikroenkapsüle edilmiştir. Örneğin; Cheddar peynirinin hızlı olgunlaşmasını sağlamak amacıyla; kaplama materyali olarak aljinat-kitosan-kalsiyum klorür (%1.6-0.1-0.1) karışımı kullanılarak aminopeptidaz enzimi mikroenkapsüle edilmiştir. Böylece peynirde tat, aroma ve tekstürel değerlerin geliştiği ve olgunlaşmanın hızlandığı tespit edilmiştir Mikroenkapsülasyonun kaşar peynirinin olgunlaşması sırasında probiyotik bakterilerin canlılığına etkisi üzerine yapılan bir çalışmada ise bakteriler ekstrüzyon ve emülsiyon teknikleriyle kaplanmıştır. Çalışmada yaklaşık 3 aylık depolama sonucunda; probiyotik bakterilerin mikroenkapsülasyon sayesinde büyük oranda canlılıklarının korunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca haşlama işlemi sırasında kaplanmamış probiyotik bakteri ilave edilen peynirde probiyotik sayısında sürekli bir azalma görülürken kaplanmış probiyotik bakteri ilave edilen peynirdeki probiyotik sayısı eşik değerin üzerinde kalmıştır (Açu vd., 2014).

Beyaz peynirde probiyotik kültür olarak "*Bifidobacterium bifidum BB-12"* ve "*Lactobacillus acidophilus LA-"* suşlarının kullanıldığı bir çalışmada enkapsüle edilmeyen kültürlerin enkapsüle edilenlere göre sayılarının daha çabuk azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca asetaldehit ve diasetil gibi tat-aroma bileşiklerinin enkapsüle kültür kullanılan peynirlerde daha yoğun olarak bulunduğu bildirilmiştir. Sert peynirlerde mikroenkapsülasyon kullanılmasıyla proteinlerin ve yağların yavaş ve dengeli indirgenmesiyle tat ve yapının geliştiği gözlemlenmiştir (Açu vd., 2014).

5.2.Yoğurt

Yoğurt önemli bir fermente süt ürünüdür. Probiyotik bakteri eklenmesi yoğurdun fonksiyonel özelliğini artırmaktadır. Ama 4.2-4.6 gibi düşük pH nedeniyle bakterilerin canlılıkları kısa sürmektedir. Bu nedenle probiyotik bakterilerin enkapsüle edilmesi canlılıklarını sürdürebilmeleri için uygun bir yöntemdir (Özcan ve Altun, 2013b).

Enkapsüle edilen probiyotik bakterilerin yoğurtta canlılıklarını koruma oranı %80-95 arasındadır. Ayrıca yapılan çalışmalarda enkapsülasyon işlemiyle bakterilerin fazla zarar görmediği ve enzimatik faaliyetlerin sınırlandırıldığı bildirilmektedir (Açu vd., 2014).

Yapılan bir çalışmada; kalsiyum aljinat-mısır karışımıyla enkapsüle edilen L. Acidophilus ve B. bifidum kültürlerinin yoğurttaki canlılık düzeyleri araştırılmıştır (Açu vd., 2014). Sonuç olarak bu tekniğin üründeki probiyotik bakterilerin hayatta kalma süresini artırdığı tespit edilmiştir (Özcan ve Altun, 2013b).

5.3.Dondurma

Laktik asit bakterilerinin sayısı dondurma ve dondurulmuş süt ürünlerinde önemli miktarda azalmaktadır. Dondurma ve dondurulmuş ürünlerde üretim sırasında bakterileri stabil hale getirebilmede bakterilerin kalsiyum aljinat jel içerisinde tutuklanması en bilinen yöntemdir. Bu teknik bakterilerin dondurma ve dondurarak depolama işlemleri sırasında serbest bakterilere göre daha uzun süre yaşamaları ve aktivite gösterebilmeleri açısından önemlidir (Özcan ve Altun, 2013b; Açu vd., 2014).

Yapılan bir araştırmada "*Lactobacillus casei*" ve "*Bifidobacterium lactis*" mikroenkapsüle edilmiş ve mikrokapsüller dondurma içerisine ilave edilmiştir. Araştırma sonunda mikroenkapsülasyon tekniği ile dondurmadaki canlı probiyotik bakterilerin sayısının artırılabileceği tespit edilmiştir (Açu vd., 2014). Yapılan başka bir araştırmada sodyum aljinat ile enkapsüle edilmiş "*L. Bulgaricus*" bakterilerinin dondurulmuş sütlü tatlılarda daha uzun süre canlı kalabildikleri tespit edilmiştir (Özcan ve Altun, 2013b).

5.4.Süt yağı

Yağ enkapsüle edilirken kaplama materyalinin emülsifikasyon ve dehidratasyon yeteneğine sahip olması çok önemlidir. Bu özelliklere sahip bileşikler sodyum kazeinat ve serum protein konsantrasyonlarıdır (Açu vd., 2014). Süt yağının mikroenkapsülasyon tekniği ile raf ömrü ile ilgili çalışmaları olumlu sonuçlar vermektedir (Kınık vd., 2014). Aynı zamanda mikroenkapsülasyon tekniği ile oksidasyona dayanıklılığı artmakta ve ambalajlama kolaylığı sağlanabilmektedir (Aloğlu ve Öner, 2010).

Tereyağında mikroenkapsülasyon işleminde kaplama materyalinde karbonhidrat olması işlemin verimini artırmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda kaplama materyali olarak peynir altı suyu proteinleri ve maltodekstrinin kullanıldığı mikroenkapsülasyon işleminin ticari tereyağı için etkili bir sistem olduğu tespit edilmiştir (Açu vd., 2014).

6. SONUÇLAR

Özellikle 1980'li yılların sonlarında mikroenkapsülasyon teknikleri ile ilgili pek çok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalarla peynir, yoğurt ve dondurma gibi süt ürünlerinde tat ve aromanın gelişmesinde ve belli bir düzeyde tutulmasında mikroenkapsülasyon tekniğinin çok önemli olduğu belirlenmiştir.

Mikroenkapsülasyon; süt ürününün üretimi, depolanması ve sindirimi sırasında probiyotik bakterilerin canlılığını yitirmemesi için kullanılabilecek bir işlemdir. Eklenmesiyle ürünün duyusal özelliklerinde çok fazla bir değişime neden olmaması önemli bir avantajdır. Ancak dondurma ve dondurulmuş ürünlerde partikül boyutunun doku ve duyusal özellikleri olumsuz etkilemesinden dolayı daha az kullanılmaktadır. Peynir, yoğurt ve dondurulmuş birçok süt ürününde mikroenkapsüle edilmiş probiyotik bakteri kullanımı hakkında pek çok araştırma vardır. Süt ürünlerinde probiyotik canlı hücrelerin enkapsülasyonunda yaygın olarak kullanılan doğal polimerler; aljinat, k-karragenan ve jellan zamkı'dır.

Yapılan çalışmalarda peynir üretiminde mikroenkapsülasyon teknolojisinin kullanımıyla peynirlerin daha çabuk olgunlaşabildiği tespit edilmiştir. Bu çalışmaların daha ekonomik ve verimli ürün üretimine katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Mikroenkapsülasyon teknolojisi ile üretilen ürünler az da olsa piyasada bulunabilmektedir. Ancak çalışmaların pek çoğu laboratuvar aşamasındadır. Teknolojinin daha da gelişmesiyle ve tüketici istekleri doğrultusunda süt ürünleri üretiminde mikroenkapsülasyon teknolojisinin kullanımının artabileceği bildirilmektedir.

KAYNAKLAR

Açu, M.; Kınık, Ö.; Yerlikaya, O. (2014). Mikroenkapsülasyon ve Süt Teknolojisindeki Yeri, Akademik Gıda, 12(1): 97-107.

Aishwarya, S., Mahalakshmı, S., and Sehgal, P.K. (2008). Collagen-coated polycaprolactone microparticles as a controlled drug delivery system, Journal of Microencapsulation. 25(5): 298–306,.

Aloğlu, H.Ş.; Öner, Z. (2010). Peyniraltı Suyu Proteinlerinin Mikroenkapsülasyon Teknolojisinde Kaplama Materyali Olarak Kullanım Olanakları, Akademik Gıda, 8(3): 38-42.

Anal, A.K.; Singh, H. (2007). Recent Advances In Microencapsulation Of Probiotics For Industrial Applications And Targeted Delivery, Trends in Food Science and Technology, 18: 240-251.

Banning, T.P. and Heard, C.M. (2002). Binding of doxycycline to keratin, melanin and human epidermal tissue, International Journal of Pharmaceutics 235:219–227.

Bokor-Bratic M., and Brkanic T. (2000). Clinical use of tetracycline in the treatment of periodontal diseases. Med Pregl. 53:266-271.

Burger, J.J. Tomlinson, E., Mulder, E.M.A., McVie, J.G. (1985). Albumin microspheres for intra-arterial tumour targeting. I. Pharmaceutical aspects, International Journal of Pharmaceutics. 23:(3) 333-344.

Choi, D. H., Moon, I. S., Choi, B. K., Paik, W., Kim, Y. S., Choi, S. H., Kim, C.K. (2004). Effects of sub-antimicrobial dose doxycycline therapy on cervicular fluid MMP-2, and gingival tissue MMP-9, TIMP-1 and IL-6 levels in chronic periodontitis. Journal of Periodontal Research, 39:20–26.

Dhandayuthapani, B., ToruMaekawa, Y. Y and Kumar, D. S. Polymeric Scaffolds in Tissue Engineering Application: A Review, International Journal of Polymer Science, Volume 2011, Article ID 290602, 19 pages.

Dhanaraju, M.D. Gopinath, D. Ahmed, M.R. Jayakumar, R. and Vamsadhara, C. (2006). Characterization of polymeric poly(ε-caprolactone) injectable implant delivery system for the controlled delivery of contraceptive steroids, Wiley Periodicals, Inc. J Biomed Mater Res 76A 63-72.

Freiberg, S. and Zhu, X.X. (2004). Polymer microspheres for controlled drug release, International Journal of Pharmaceutics 282 1-18.

Gökmen, S., Palamutoğlu, R. ve Sarıçoban, C. (2012). Gıda endüstrisinde enkapsülasyon uygulamaları, Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 7, No: 1, 36-50.

Gunatillake, P.A. and Adhikari, R. (2003). Biodegradable synthetic polymers for tissue engineering.European Cells and Materials Vol. 5. 1-16.

Jeong, J.C., Jaeyoung, L. and Cho, K. (2003). Effects of crystalline microstructure on drug release behavior of poly (ε-caprolactone) microspheres, Journal of Controlled Release 92 249-258.

Jiang, T. Petersen, R.R. Call, G. Ofek, G. Gao, J. and Yao, J.Q. (2011). Development of chondroitin sulfate encapsulated PLGA microsphere delivery systems with controllable multiple burst releases for treating osteoarthtiris, J.Biomed Mater Res. Part B: Appl Biomater. 97B 355-363.

Koç, M.; Sakin, M.; Kaymak-Ertekin, F. (2010). Mikroenkapsülasyon ve Gıda Teknolojisinde Kullanımı., Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(1): 77-86.

Kınık, Ö.; Kavas, G.; Yılmaz, E. (2003). Mikroenkapsülasyon Tekniği ve Süt Teknolojisindeki Kullanım Olanakları, Gıda, , 28(4): 401-407.

Nair, L.S., Laurencin, C.T., (2006). Polymers as biomaterials for tissue engineering and controlled drug delivery. Adv Biochem Eng Biotechnol. 102:47-90.

Özcan, T.; Altun, B. (2013a) Süt ürünlerinde Probiyotik Bakterilerin Mikroenkapsülasyonu I: Enkapsülasyon Teknikleri. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, , 27(2): 93-104.

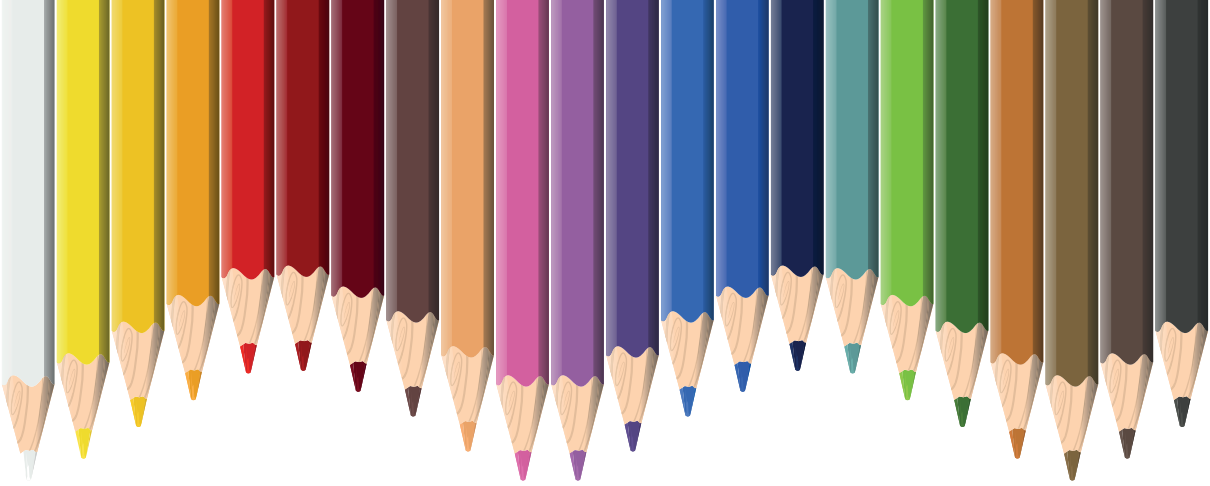
Özcan, T.; Altun, B. (2013b). Süt ürünlerinde Probiyotik Bakterilerin Mikroenkapsülasyonu II: Kaplama Materyalleri ve Süt Ürünlerinde Uygulamalar. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 27(2): 105-114.

Perkins N.C. and Heard, C.M. (1999). In vitro dermal and transdermal delivery of doxycycline from ethanol/migliol 840 vehicles, International Journal of Pharmaceutics, 190: 155-164.

Ünal E. ve Erginkaya, Z. (2010). Probiyotik mikroorganizmaların mikroenkapsülasyonu, Gıda 35 (4):297-304.

Wang, S., Guo, A. and Cheng, L. (2008). Disodium norcantharidate loaded poly(ε-caprolactone) microspheres I. Preparation and evaluation, International Journal of Pharmaceutics 350:130–137.

Wang, X. Wang, Y. Wei, K. Zhao, N. Zhang, A. and Chen, J.(2009). Drug distribution within poly(ε-caprolactone) microspheres and in vitro release, Journal of Materials Processing Technology 209 348-354.



Bölüm 19

GELİŞMİŞ VE GELİŞMEKTE OLAN ÜLKELER İÇİN BİR ÇEVRESEL ETKİNLİK DEĞERLENDİRMESİ

Melike Kübra Ekiz Bozdemir[1]

1 Araştırma Görevlisi, Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ORCID ID: 0000-0003-3340-0484

1.GİRİŞ

Sanayi devrimi ile endüstriyel süreçler büyük ölçüde hız kazanmaya başlamıştır. Endüstriyel süreçlerin bir girdisi olan enerji üretiminde yaygın olarak kullanılan kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların kullanımı da bu süreçte artmıştır. Fosil yakıtlar, birim başına yüksek miktarda enerji içermeleri bir diğer ifade ile yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları, dünya genelinde geniş bir alanda bulunabilirliklerinden dolayı geniş kullanılabilirlikleri ve ekonomik fiyatı ile enerji maliyetlerini düşük tutmaları gibi avantajlara sahiptir. Dahası fosil yakıtların günümüzde tercih sebepleri arasında, fosil yakıtların üretim ve iletim gibi mevcut enerji altyapısına sahip olması, taşıma ve depolama kolaylığı sağlaması sayılabilir. Fakat, fosil yakıtlar sınırlı doğal kaynaktır ve zamanla tükenme riski vardır. Ayrıca, fosil yakıtların büyük bir kısmı belirli coğrafi bölgelerden tedarik edilmekte ve bundan dolayı enerji arzı ekonomik, jeopolitik ve siyasi faktörlere bağlı hale gelmektedir. Bu dezavantajların yanı sıra, fosil yakıtların yanması sonucunda hava kalitesini etkileyen zararlı partikül madde ve kimyasal bileşenler ortaya çıkmakta, atmosfere büyük miktarda karbon dioksit (CO_2) salınarak sera etkisi oluşturmakta ve bu durum küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Ayrıca, petrol sondajları ve madencilik faaliyetleri sırasında su ve toprak kirliliği de oluşabilmektedir. Bunlara ek olarak, dünyada nüfusun artması, kentleşme, ormansızlaşma ve arazi örtüsündeki tahribatlar da atmosfere salınan sera gazı miktarını arttırmış, iklim değişikliği ve küresel ısınmaya neden olmuştur. Sera gazı salınımının kontrolsüz bir biçimde devam etmesi durumunda, su, enerji ve gıda kıtlığının oluşacağı, sıcak bölgelerin daha sıcak soğuk bölgelerin daha soğuk olması bir diğer ifade ile hava koşullarının giderek artan oranı ile insan ölümlerinin gerçekleşeceği, deniz seviyesinin artması ile bazı ada ülkelerinin sular altında kalacağı bilim insanları tarafından ifade edilmektedir (Ünal , 2014). Bu durumlardan dolayı toplu insan göçlerinin kaçınılmaz olduğu ifade edilmektedir.

Fosil yakıtların kullanılması sonucunda ortaya çıkan çevre sorunları, sera gazı salınımı, küresel ısınma ve iklim değişikliği hem yerel hem de ülke yönetimlerinin üzerinde çalıştıkları bir konu haline gelmiştir. Fakat bu sorunlar, ülke sınırlarını aşarak tüm dünyayı etkileyen evrensel bir sorun olarak ele alınmalıdır. Bu bağlamda ülkelerin kolektif olarak bu sorunlara çözüm arayışı ilk olarak Viyana Sözleşmesi ve Montreal Protokolü ile başlamıştır. 1988 yılında düzenlenen Uluslararası İklim Değişikliği Paneli ve

1990 yılında gerçekleştirilen İkinci Dünya İklim Konferansı ile çözüm arayışı devam etmiştir. 1992 yılında Rio'daki konferansta kabul edilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ise günümüze kadar uluslararası düzeyde iklim değişikliği ile ilgili olarak yapılan en kapsamlı sözleşme olmuştur (World Meteorological Organization, 2009). Sözleşmenin amacı sera gazı yoğunluğunu insan müdahalesi ile sabitlenecek düzeye indirmektir. Bu bağlamda ülkeler, emisyon kaynaklarını sınırlandırarak sera etkisi yaratan gaz salınımlarını 1990 yılı seviyesine indirmeyi hedefleyen gelişmekte olan bir diğer ifade ile Ek-1 ülkeleri ve hem söz konusu gazların salınımını azaltacak hem de gelişmekte olan ülkelerin yükümlülüklerini yerine getirmesi için maddi destek ve teknoloji transferi yapmakla yükümlü olan sanayileşmiş bir diğer ifade ile gelişmiş Ek-II ülkeleri olarak kategorize edilmiştir (Görmez, 2020). Tablo 1'de Ek-I ve Ek-II ülkeleri yer almaktadır.

Tablo 1.Ek-I ve Ek-II ülkeleri (Görmez, 2020)

Ek-I Ülkeleri	Ek-II Ülkeleri
Pazar Ekonomisine Geçiş Sürecinde Olan Ülkeler: Türkiye, Lichtenstein, Monako, Beyaz Rusya, Bulgaristan, Estonya, Letonya, Litvanya, Macaristan, Polonya, Romanya, Rusya Federasyonu, Ukrayna, Çek Cumhuriyeti, Slovenya, Slovakya, Hırvatistan.	Sanayileşmiş Ülkeler: Almanya, ABD, AB, Avustralya, Avusturya, Belçika, Danimarka, Finlandiya, Fransa, İngiltere, Hollanda, İrlanda, İspanya, İsveç, İsviçre, İtalya, İzlanda, Japonya, Lüksemburg, Kanada, Norveç, Portekiz, Yeni Zelanda, Yunanistan.

Konferansta alınan önemli kararlardan biri de sera gazı salınımı ve iklim değişikliği üzerine toplantıların düzenli olarak devam etmesidir. Bu bağlamda, ilk olarak 1995, 1996 ve 1997 yıllarında Üçüncü Taraflar Konferansı gerçekleştirilmiştir (Duru, 2001). Kyoto'da gerçekleştirilen son Üçüncü Taraflar Konferansı'nda sera gazı salınımının kontrol altına alınması ve önlemlerin alınması adına yaptırım gücü olan Kyoto Protokolü imzalanmıştır. Protokol, endüstriyel ülkelere ait toplam salınımların en az %55'ine sahip olan gelişmiş ülkelerce imzalanması gerektiğinden başlangıçta ülkelerin tam katılımı sağlanamamış, 2004 yılında Rusya'nın protokolü imzalanması sonucunda yürürlüğe girebilmiştir. Burada küresel sera gazı birikiminde en büyük payın gelişmiş ülkelere ait olduğu ve gelişmekte olan ülkelerde ise kişi

başına düşen salınımın düşük olduğu fakat ilerleyen yıllarda artacağı ifade edilmiştir. Bu bağlamda gelişmiş ülkelerden sera gazı salınımlarını başlangıç yılı olarak kabul edilen 1990 yılı salınımlarına düşürmeleri istenmiştir. Bu hedefe ulaşılabilmesi için ülkelere karbon ticareti yapma esnekliği tanınmıştır. Bir diğer ifade ile karbon salınımında hedefine ulaşamayan ülkeler gelişmekte olan ülkelerin karbon salınım kotasını satın alabilmektedir. Gelişmiş ülkelerin gelişmekte olan ülkelerden karbon salınım kotası satın alması ile gelişmekte olan ülkeler maddi olarak zenginleşirken gelişmiş ülkeler finansman açısından zarara uğramaktadır. Bunun yanı sıra, sera gazı salınımında önemli rol oynayan Hindistan, Brezilya ve Çin gibi ülkeler gelişmekte olan ülkeler olarak tanımlanmış ve herhangi bir yükümlülük ile ilişkilendirilmemişlerdir. Sera gazı salınımı oldukça yüksek olan Çin yeni sanayileştiğini ve salınımlarının daha başında olduğunu, ABD gibi sanayileşmiş ülkelerin yıllarca salınımları ile çevreye zarar verdiklerini ve bundan dolayı öncelikli olarak sorumlu tutulmaları gerektiğini ifade etmiştir. Çin ve ABD arasındaki bu gerginlik yükümlülük altına giren diğer ülkeleri de olumsuz etkilemiş ve Kyoto Protokolü'nü etkinliğini yitirmesinde etkili olmuştur.

Yeşil gelecek için önemli adımlardan biri olan Kyoto Protokolü ile sera gazı salınımı 1990 seviyesine çekilemese de ülkelerin sera gazı salınımlarını önemsemelerini ve bu bağlamda önlemler almaları için öncü olmuştur. 2020 yılında Kyoto Protokolü'nün sonlanması ile bütün ülkeler tarafından oybirliği ile kabul edilen ve yürürlüğe giren Paris İklim Anlaşması çok daha kapsayıcı bir yapıya sahiptir (Kaya, 2020). Ayrıca anlaşma ile köklü bir değişimin yapılması gerektiği ve bu değişimin zaman alıcı olduğu vurgulanmıştır. Sera gazı salınımlarının azaltılması ve buna bağlı olarak küresel ısınmanın 2 derecenin altında tutulması için maddi kaynakların oluşturulması ve doğru şekilde yönetilmesi, gerekli ülkelere ve alanlara aktarılması ele alınmıştır. Böylelikle sera gazı salınımının azaltılmasından sadece gelişmiş ülkeler sorumlu olmayacaktır. Ayrıca iklim değişikliğinden en çok etkilenen gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkelerin de sera gazı salınımlarını azaltmaları beklenmektedir (Boran & Kayacan, 2023).
Bu çalışmada Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nde belirtilen ve Paris İklim Anlaşması ile sera gazı salınımlarını azalmak ile yükümlü olan Ek-I ve Ek-II ülkelerinin çevresel etkinlikleri Veri Zarflama Analizi (VZA) ile değerlendirilmiştir.

Çalışma şu şekilde devam etmektedir. Bölüm 2'de temel VZA modellerine yer verilmiş ve Ek-I ve Ek-II ülkelerinin değerlendirilmesinde kullanılan Süper Etkinlik (SE) modeli anlatılmıştır. Bölüm 3'te ise uygulama ve sonuçlarına yer verilmiş ve son olarak Bölüm 4'te sonuçlara değinilmiştir.

2. VERİ ZARFLAMA ANALİZİ (VZA)

Veri Zarflama Analizi (VZA), benzer girdiler kullanarak benzer çıktılar üreten alternatif birimlerin göreceli verimliliklerini ölçmek için kullanılan parametrik olmayan ve doğrusal programlama tabanlı bir yöntemdir. Charnes, Cooper ve Rhodes tarafından bir tez kapsamında geliştirilen CCR modeli, literatürdeki ilk Veri Zarflama Analizi (DEA) modelidir (Charnes, Cooper, & Rhodes, 1978). CCR modelinde, etkin ve etkin olmayan Karar Verme Birimleri (KVB'ler) ayırt edilebilmekte, etkin KVB'ler etkinlik sınırı oluşturmakta ve etkinlik skorları 1 olmaktadır. Etkin olmayan KVB'ler im etkinlik skoru ise 0-1 arasında bir değer almakta ve etkinlik skorunun büyüklüğüne göre bir tercih sıralaması sunmaktadır. Ölçeğe Göre Sabit Getiri (CRS) varsayımı bir diğer ifade ile KVB'nin girdi veya çıktısınında bir değişim olması durumunda aynı oranda çıktı veya girdisinde değişim olan CCR modeline dışbükeylik kısıtının eklenmesi ile Ölçeğe Göre Değişken Getiri (VRS) varsayımı bir diğer ifade ile girdi veya çıktıdaki değişimin çıktı veya girdiyi azalan, sabit veya artan oranda değiştirdiği BBC modeli elde edilmektedir (Banker, Charnes, & Cooper, 1984).

Aşağıda öncelikle klasik VZA modelleri için parametre ve karar değişkenleri tanımlanmış ve daha sonrasında ise çıktı odaklı CCR modeline yer verilmiştir (Charnes, Cooper, & Rhodes, 1978). Modelde değerlendirme altında olan KVB_0'ın etkinlik skoru hesaplanmaktadır. k KVB sayısı olmak üzere, θ_k etkinlik skorunu ifade etmektedir ve bir KVB'nin etkinlik skoru ne kadar büyük ise KVB o ölçüde tercih edilmektedir.

Parametreler:

N KVB kümesi
M girdi kümesi
S çıktı kümesi
x_{ik} k. KVB'nin i.girdi değeri

y_{rk} k. KVB'nin r.çıktı değeri

Karar Değişkenleri:

θ_k k KVB'sinin etkinlik skoru

λ_k k KVB'si için giriş ve çıkış ağırlıklarını içeren matris

(CCR Model)

Maks θ_0

$$\sum_{k \in N} \lambda_k x_{ik} \leq x_{i0} \qquad \forall i \in M$$

$$\sum_{k \in N} \lambda_k y_{rk} \geq \theta_0 y_{r0} \quad \forall r \in S$$

$$\lambda_k \geq 0 \qquad \forall k \in N$$

Yukarıda yer alan CCR modeline konvekslik kısıtının ($\sum_{k \in N} \lambda_k = 1$) eklenmesi ile BCC modeli elde edilmektedir. Aşağıda çıktı odaklı BBC modeli yer almaktadır (Banker, Charnes, & Cooper, 1984).

(BCC Model)

Maks θ_0

$$\sum_{k \in N} \lambda_k x_{ik} \leq x_{i0} \qquad \forall i \in M$$

$$\sum_{k \in N} \lambda_k y_{rk} \geq \theta_0 y_{r0} \quad \forall r \in S$$

$$\sum_{k \in N} \lambda_k y_{rk} \geq \theta_0 y_{r0} \quad \forall r \in S$$

$$\lambda_k \geq 0 \qquad \forall k \in N$$

Klasik VZA modelleri olarak adlandırılan CCR ve BCC modelleri, etkin ve etkin olmayan KVB'leri birbirinden ayırmakta, etkin olmayan KVB'ler için 0-1 arasında etkinlik skoru üretirken etkin KVB'ler için 1 etkinlik skorunu üretmekte ve bundan dolayı sıralama gerçekleştirememektedir. Klasik VZA modellerinin etkin KVB'ler için bir sıralama gerçekleştirememesinden dolayı Andersen ve Petersen tarafından Süper Etkinlik (SE) (Andersen & Petersen, 1993) modeli geliştirilmiştir. SE modelinde, etkin sınırı oluşturan etkin KVB'nin veri setinden çıkarılması ile etkin sınırın kırılması ve yeni etkin

sınırın oluşması söz konusudur. Etkinliği değerlendirilen KVB oluşan yeni etkin sınırın dışında kalarak etkinlik skorunu 1'in üzerine çıkarmaktadır. Etkin KVB'lerin etkinlik skoru ne kadar büyük ise KVB o ölçüde tercih edilmektedir. Etkin olmayan bir KVB etkin sınırda yer alamayacağı için etkinlik skoru klasik modeller ile aynı olmaktadır. Aşağıda SE modeli yer almaktadır.

(SE Modeli)

Maks θ_0'

$$\sum_{k \in N\text{-}\{0\}} \lambda_k x_{ik} \leq x_{i0} \qquad \forall i \in M$$

$$\sum_{k \in N\text{-}\{0\}} \lambda_k y_{rk} \geq \theta_0' y_{r0} \quad \forall r \in S$$

$$\lambda_k \geq 0 \qquad \forall k \in N$$

Bu çalışmada etkin ve etkin olmayan KVB'leri ayırabilen hem etkin hem de etkin olmayan KVB'ler için sıralama yapabilen SE modeli ile gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin çevresel etkinlikleri değerlendirilmiştir.

3. UYGULAMA

Sanayi devrimi ile artan fosil yakıt tüketimi sonucunda başta CO_2 olmak üzere sera gazı olarak tanımlanan birçok zararlı gaz ortaya çıkmakta ve bu gazlar, hava kirliliğine ve sera etkisine neden olmaktadır. Sera gazı salınımın artması ile hava sıcaklığı artmış bir diğer ifade ile küresel ısınma kavramı ile karşı karşıya kalınmıştır. Küresel ısınma sonucunda ise iklim değişmiş, buzulların erimesi ile birçok ada ülkesi sular altında kalma tehlikesi ile yüzleşmiştir. Bu durumun yanı sıra kentsel yaşamın artması ve buna bağlı olarak ormanlık alanların azalması, su ve toprak kirliliğine bağlı olarak ise su ve gıda kıtlığının yaşanması öngörülmektedir. Ayrıca gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkelerde bu durumların yaşanması ülkeleri ekonomik olarak da etkileyeceğinden dolayı toplu insan göçlerinin olacağı beklenmektedir. Daha iyi bir çevre ve gelecek bırakmak adına ülkeler sera gazı salınımlarını azaltmak adına uluslararası girişimlerde bulunmuşlardır. Bu çalışmada Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nde Ek-I ve Ek- II ülkeler olarak tanımlanmış ve daha sonrasında sera gazı salınımlarını azaltmak adına yaptırım gücü olan Kyoto Protokolü ve Paris İklim Anlaşması'nı imzalamış olan gelişmiş ve

gelişmekte olan ülkelerin çevresel etkinlik değerlendirmesi VZA modellerinden biri olan SE modeli ile değerlendirilmiştir. SE modeli ile ülkeler etkin ve etkin olmayan olarak birbirinden ayrılmakta ve hem etkin hem de etkin olmayan KVB'ler için bir sıralama elde edilmektedir.

Çevresel etkinlik ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde girdilerin minimize edilmesi veya çıktıların maksimize edilmesi klasik anlayışının dışına çıkıldığı görülmektedir (Yang & Pollitt, 2009). İstenmeyen girdi/çıktı olarak adlandırılan bu anlayışta, girdilerin maksimize edilmesi veya çıktıların minimize edilmesi söz konusudur. İstenmeyen girdiye örnek olarak atık işleme sürecindeki atık miktarı ve bir işletmedeki enerji tüketiminin yenilenebilir olması verilebilir. İstenmeyen çıktı olarak ise hatalı ürün sayısı, kirletici madde (CO_2 , SO_2 ve NO_x) üretimi örnek olarak verilebilir (Yang & Pollitt, 2010; Chen, Song, & Xu, 2015; Wu, Zhu, Ji, Chu, & Liang, 2016).

İstenmeyen girdi/çıktı sorununun çözüme kavuşturulması için literatürde farklı yaklaşımlar önerilmiştir. Geliştirilen bu yaklaşımları direkt ve dolaylı olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Direkt yaklaşımlardan biri, istenmeyen girdinin çıktı veya istenmeyen çıktının girdi olarak değerlendirilmesidir (Liu & Sharp, 1999). Fakat Seiford ve Zhu (Seiford & Zhu, 2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bu yaklaşımın gerçek üretim sürecini yansıtmayacağına ve dolayısı ile doğru bir değerlendirme gerçekleştirilemeyeceğine değinilmiştir. Dolaylı yaklaşımlar incelendiğinde ise istenmeyen girdi/çıktıların monoton azalan bir fonksiyon yardımı ile dönüştürüldüğü görülmektedir. Örneğin; Koopmans (Koopmans , 1951) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, *U* istenmeyen girdi/çıktı değerleri olmak üzere, f(*U*)= -*U* dönüşümü uygulanmıştır. Bu monoton azalan dönüşüm fonksiyonun en büyük dezavantajı, verilerin dönüşüm sonrası negatif değerler almasıdır. Bundan dolayı etkinlik değerlendirmesinde negatif verileri göz önüne alan modeller tercih edilmelidir. Ali ve Seiford (Ali & Seiford, 1990) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise $f_i^k(U) = -u_i^k + \beta_i$ dönüşümü önerilmiştir. Burada *i* istenmeyen girdi/çıktı ve *k* KVB olmak üzere ilgili dönüşüm fonksiyonunun pozitif değer alabilmesi için β'nın yeterince büyük bir skaler sayı olması gerekmektedir. Bu dönüşüm fonksiyonun en büyük dezavantajı ise farklı β değerlerine göre KVB'lerin etkinlik skorlarının ve buna bağlı olarak sıralamalarının değişmesidir. Lovell vd. (Lovell, Pastor, & Turner, 1995) ise OECD ülkelerinin etkinliklerini değerlendirmek adına $f_i^k(U) = 1/u_i^k$ dönüşümünden yararlanmıştır. Çalışma kapsamında

istenmeyen girdi/çıktı sorununun çözümü için önerilen modele daha uygun olduğu düşünülen $f_i^k(U) = 1/u_i^k$ dönüşüm fonksiyonu tercih edilmiştir.

Çalışma kapsamında gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin çevresel etkinlik değerlendirmesi için istenmeyen girdi, girdi, istenmeye çıktı ve çıktı belirlenmiştir. AR&GE harcamaları ülkelerin en büyük gelişmişlik göstergelerinden biri olduğundan çevresel etkinlik değerlendirmesinde maksimize edilmek istenmiş ve istenmeyen girdi olarak ele alınmıştır. Bir diğer istenmeyen girdi olan yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin tüketimine ağırlık verilmesi durumunda sera gazı emisyonu azalmış olacak ve bunun doğal sonucu olarak iklim değişikliği, kuraklık, aşırı yağışlar, doğal afetler gibi olayların azalması sağlanabilecektir. Bir ülkenin yenilenebilir enerji tüketimini artırması durumu maksimize edilmek istenen bir durum olduğundan dolayı bu girdi istenmeyen girdi olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında belirlenen çıktılar ise ormanlık alan, kişi başına Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) ve CO_2 emisyonudur. Sera gazı emisyonlarının azaltılması istenildiğinde karşımıza çıkan ilk önlemlerden biri ormanlık alanların çoğaltılması uygulamasıdır. Bundan dolayı ülkelerin ormanlık alanlarının toplam arazi alanına göre yüzdesi değerlendirmeye alınarak hem ülkelerin yüz ölçümleri hem de yüz ölçümlerine göre sahip oldukları ormanlık alan değerlendirilmiştir. Bir diğer çıktı olan kişi başına GSYİH ($/kişi) ise bir ülkenin ekonomik olarak gelişmişliğini ifade etmektedir. İstenmeyen çıktı olarak ele alınan CO_2 emisyonu ise sera gazı emisyonunun büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Sera gazı emisyonunu azaltmak adına CO_2 emisyonunda olabildiğince azaltılması gerekmektedir.

Tüm girdi ve çıktı verileri "World Bank Open Data" internet sitesinden elde edilmiştir (World Bank Open Data, 2020). Tablo 2'de gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin SE modeli ile elde edilen çevresel etkinlik skorları yer almaktadır.

Tablo 2. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin çevresel etkinlik skorları

Ülke	SE skoru	Ülke	SE skoru
İsveç	1,949	Belçika	0,407
İsviçre	1,647	Avustralya	0,394
Norveç	1,258	Kanada	0,383
İzlanda	1,195	Yeni Zelanda	0,375
Japonya	1,000	Macaristan	0,361

Finlandiya	0,952	Birleşik Krallık	0,333
Letonya	0,802	Hollanda	0,326
Danimarka	0,759	Çek Cumhuriyeti	0,297
Avusturya	0,711	İtalya	0,278
Amerika Birleşik Devletleri	0,641	İrlanda	0,272
Slovenya	0,606	İspanya	0,269
Hırvatistan	0,599	Rusya Federasyonu	0,243
Almanya	0,553	Slovak cumhuriyeti	0,242
Fransa	0,534	Türkiye	0,235
Romanya	0,486	Yunanistan	0,212
Litvanya	0,469	Bulgaristan	0,208
Lüksemburg	0,464	Ukrayna	0,168
Estonya	0,428	Polonya	0,159
Portekiz	0,420	Belarus	0,097

Değerlendirmeye alınan gelişmiş ülkelerden bazıları etkin iken bazı ülkelere etkin değildir. Gelişmiş ülkelerden İsveç, İsviçre, Norveç, İzlanda ve Japonya etkin ülkelerdir. Etkin olmayan gelişmiş ülkeler ise Finlandiya, Danimarka, Avusturya, Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, Fransa, Lüksemburg, Portekiz, Kanada, Belçika, Avustralya, Yeni Zelanda, Birleşik Krallık, Hollanda, İtalya, İspanya, Rusya, ve Yunanistan'dır. Gelişmekte olan ülkeler arasında etkin KVB yer almamaktadır. Bir diğer ifade ile gelişmekte olan ülkeler etkin olmayan KVB'lerdir.

4. SONUÇLAR

Salınan zararlı gaz miktarlarının azaltılması ile oluşan küresel ısınma, doğal afet, kuraklık ve bu durumlara bağlı olarak gerçekleşen göçlerin önüne geçmek adına ülkeler uluslararası platformda aksiyona geçmişlerdir. Bu çalışmada Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nde Ek-I ve Ek-II olarak tanımlanmış ve sera gazı salınımını azaltmak adına Kyoto Protokolü ve Paris İklim Anlaşmasını imzalayan gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin çevresel etkinlikler SE modeli ile değerlendirilmiştir. Etkinlik skorlarına bakıldığında etkin KVB'lerin sırası ile İsveç, İsviçre, Norveç, İzlanda ve Japonya gibi gelişmiş ülkeler olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra gelişmiş ülkelerden bazıları sıralamada oldukça geri planda kalmıştır. Örneğin; Yunanistan, Rusya, İspanya, İtalya. Bu ülkelerin çevresel etkinliklerini artırması gerekmektedir ve bu bağlamda AR&GE harcamalarını, ormanlık

alanlarını, yenilenebilir enerji tüketim miktarlarını artırmaları ve CO_2 emisyonlarını azaltmaları önerilmektedir. Değerlendirmeye alınan gelişmekte olan ülkelerin tümü etkin olmayan KVB'dir. Bu bağlamda AR&GE harcamalarını, ormanlık alanlarını, yenilenebilir enerji tüketim miktarlarını artırmaları ve CO_2 emisyonlarını azaltmalarının yanı sıra GSYH'yi de artırmaları önerilmektedir.

Kaynakça

Aizebeokhai, A. P. (2009). Global warming and climate change: Realities, uncertainties and measures. *International Journal of Physical Sciences, 4*(13), 868-879.

Ali, A. I., & Seiford, L. (1990). Translation invariance in data envelopment analysis. *Operations Research Letters, 9*(6), 403-405.

Andersen, P., & Petersen, N. C. (1993). A procedure for ranking efficient units in Data Envelopment Analysis. *Management Science, 39*, 1261-1264.

Banker, R., Charnes, A., & Cooper, W. (1984). Some models for estimating techical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science, 30*, 1078-1092.

Barrett, S. (1998). Political economy of the Kyoto protcol. *Oxford Review of Economic Policy, 14*(4), 20-39.

Bhattacharjee, P. K. (2010). Global Warming Impact on the Earth. *International Journal of Environmental Science and Development, 1*(3), 219-2020.

Boran, M., & Kayacan, B. (2023). The Economic Impact of the Paris Agreement on Sectoral Outputs in Türkiye: An Input-Output Approach. *Istanbul Journal of Economics, 73*(1), 419-452.

Charnes, A., Cooper, W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research, 2*, 429-444.

Chen, J., Song, M., & Xu, L. (2015). Evaluation of environmental efficiency in China using data envelopment analysis. *Ecological Indicators, 52*, 577–583.

Duru, B. (2001). Viyana'dan Kyoto'ya İklim Değişikliği Serüveni. *Mülkiye, 25*(230), 301-333.

Görmez, K. (2020). *Çevre Sorunları.* Ankara: Nobel Yayınları.

Kaya, H. (2020). KyotoWdan Paris'e Küresel İklim Politikaları. *Meriç Uluslararası Sosyal ve Stratejik Araştırmalar Dergisi, 4*(10), 165-191.

Koopmans , T. (1951). An analysis of production as an efficient combination of activities. *Activity Analysis of Production and Allocation* (s. 33-97). içinde Newyork: Wiley.

Liu, W., & Sharp, J. (1999). DEA Models via Goal Programming. *Data Envelopment Analysis in the Service Sector* (s. 79-101). içinde Wiesbaden: Springer .

Lovell, C., Pastor, J., & Turner, J. (1995). Measuring macroeconomic performance in the OECD: A comparison of European and non-European countries. *European Journal of Operational Research, 87*(3), 507-518.

Seiford, L., & Zhu, J. (2002). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European Journal of Operational Research, 142*(1), 16-20.

Ünal , S. (2014). Yeşil Teori. M. Şahin, & O. Şen içinde, *Uluslararası ilişkiler teorileri: temel kavramlar*. Ankara: Kripto Yayınları.

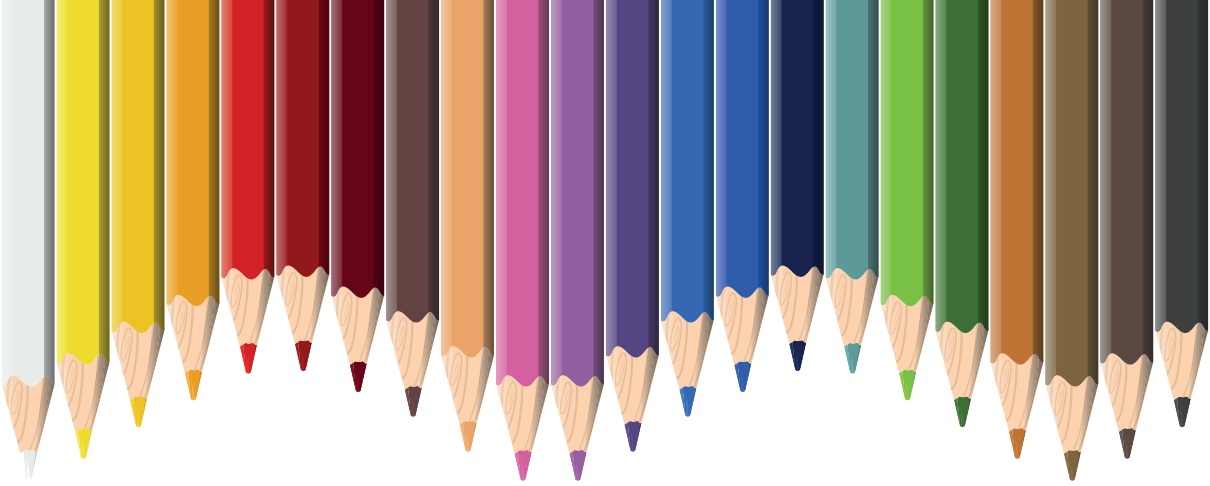
World Bank Open Data. (tarih yok). *World Bank Open Data*. 05 04, 2021 tarihinde https://data.worldbank.org/ adresinden alındı

World Meteorological Organization. (2009). World Climate Conference-3. *Bulletin, 58*(3).

Wu, J., Zhu, Q., Ji, X., Chu, J., & Liang, L. (2016). Two-stage network processes with shared resources and resources recovered from undesirable outputs . *EuropeanJournalofOperationalResearch, 251*(1), 82–197.

Yang, H., & Pollitt, M. (2009). Incorporating both undesirable outputs and uncontrollable variables into DEA:The performance of Chinese coal-fired power plants. *European Journal of Operational Research, 197*(3), 1095–1105.

Yang, H., & Pollitt, M. (2010). The necessity of distinguishing weak and strong disposability among undesirable outputs in DEA:Environmental performance of Chinese coal-fired power plants. *Energy Policy, 38*(8), 4440–4444.



Bölüm 20

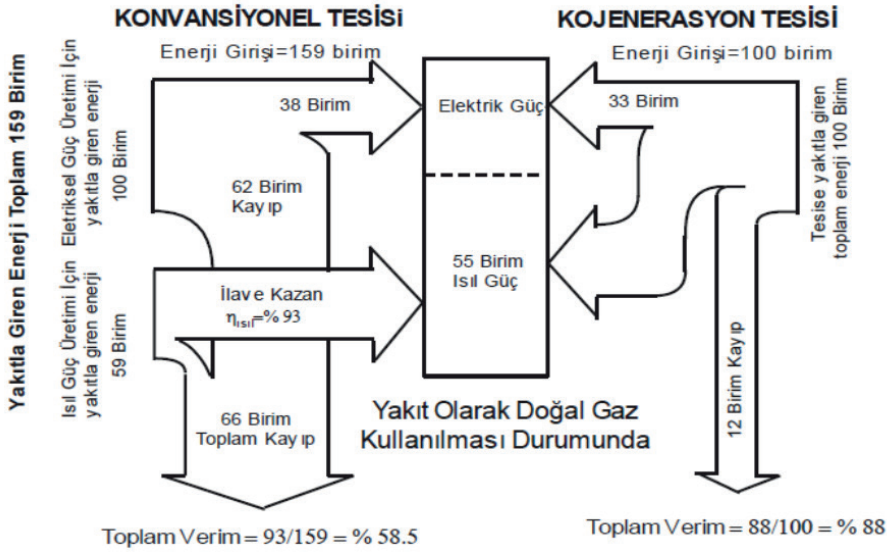
REKÜPERATÖRLÜ KOJENERASYON TESİSLERİNDE HAVA FAZLALIK KATSAYISININ PERFORMANS ÜZERİNE ETKİSİ

Rabi KARAALİ[1]

1 Doç.Dr.; Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh.Bölümü rabikar@gmail.com
ORCID No: 0000-0002-2193-3411

GİRİŞ

Enerjinin kullanımı, üretimi, iletimi ve depolama verimleri, maliyeti dolaysız etkilediğinden günümüz rekabet Dünya'sında çok önemlidir. Enerjinin kullanımı, üretimi, iletimi ve depolanmasında kayıplar en önemli verimsizliği artıran faktördür. Kayıpları azaltmanın en önemli yolları kojenerasyon (iki enerji türünü daha çok elektrik ve ısı aynı sistemde ve aynı anda üretmek), trijenerasyon (üç enerji türünü daha çok elektrik, soğutma ve ısı aynı sistemde ve aynı anda üretmek), çevrimlerde verimli cihaz kullanımı ve uygun olmayan çalışma koşullarıdır [1, 2, 3]. Günümüzde endüstri ve günlük yaşamında en yaygın ve çok tüketilen enerji çeşitleri elektrik ve ısıdır. Bunların konvansiyonel sistemlerde değil, kojenerasyonla üretilmesi yüksek verimlilik için gereklidir. Konvansiyonel sistemlerin, ısı ve elektrik enerjisini ayrı ayrı ürettiğinden verimleri daha düşüktür. Kojenerasyon tesislerinde enerji ve ekserji verimi 30% dolayında konvansiyonel tesislerden fazladır [4, 5, 6].

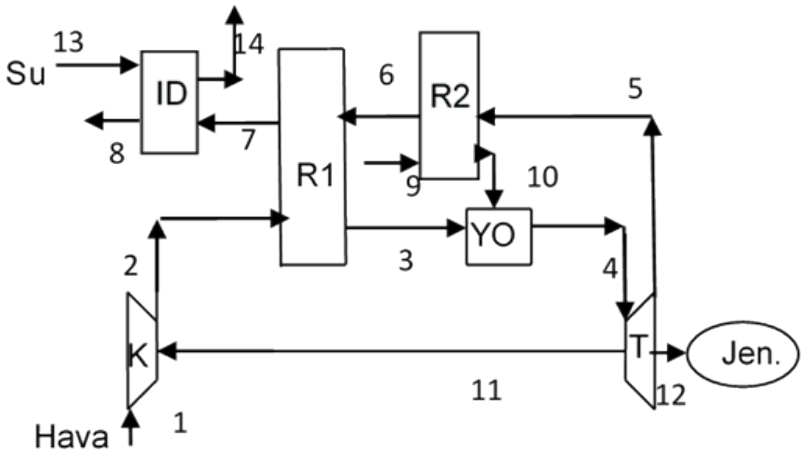


Şekil 1. Konvansiyonel metotla ısı ve elektrik üreten sistem ile kojenerasyon sisteminin karşılaştırılması [7].

Tesisin yatırım ve işletme masrafları da tek bir tesis ile iki çeşit enerji üretildiği için daha fazla düşüktür. Ayrıca çevre kirliliği ve atmosfere verilen emisyonların miktarı azaldığından klasik tip çevrimlerden daha temizdir. Kojenerasyon sistemlerini çalışma yöntemlerine göre; gaz türbinli, motorlu

sistemler, yakıt pilleri, buhar türbinli, gaz-buhar türbinli kombine şeklinde sınıflandırabiliriz Kojenerasyon tesislerinin yerinin kurulumdan önce atmosfer sıcaklığı, denizden yüksekliği, havasının ortalama nemi ve sıcaklığı da saptanmalıdır. NOx'leri azaltmak ve meydana gelmesini önlemek için kompresöre giren hava kütlesine % 2'si kadar demineralize edilmiş su zerrecikleri katma veya yanma odasının içine su zerrecikleri veya buhar enjektesi gibi metotlar uygulanabilir [8, 9, 10].

Gaz türbinli rekuperatorlü kojenerasyon tesislerinin ana cihazları kompresör, rekuperatörler, yanma odası, gaz türbini ve atık ısı buhar üretim (HRSG) cihazıdır. Gaz türbinli kojenerasyon tesislerinde temel ana makine gaz türbinidir. Gaz türbini tüm tesisin ve sistemin, verimini, çalışma şekli, tarzı ve metodunu belirler. Pistonlu, santrifüj veya eksenel çeşitleri olan kompresör gaz akışkanı veya havayı yüksek basınca çıkaran bir cihazdır. Egzoz gazlarının ısısı gaz türbininden sonra rekuperatör vasıtasıyla kompresör çıkışından gelen basınçlı havanın sıcaklığını yanma odasından önce artırır. İkinci bir reküperatörde yanma odasına verilen yakıtın ısısını artırmak üzere kullanılabilir [11, 12, 13]. Rekuperatörler genellikle levha tipi imal edilir ve yüksek sıcaklığa dayanıklı, ısı iletim özelliği çok iyidir. Rekuperatörlerden gelen sıcak ve basınçlı hava ile sıcak yakıt, yanma odasında yakılarak yüksek basınçta ve çok daha yüksek sıcaklıkta egzoz gazları elde edilir. Atık ısı geri kazanım cihazı veya ısı değiştiricisi, (HRSG) kalan egzoz ısı enerjisinin büyük miktarını suya verip sıcak su ya da yüksek sıcaklık ve basınçta buhar üretir. Jeneratörde, gaz türbininden elde edilen mekanik enerjiden elektrik enerjisi üretilir [14, 15, 16]. Şekil 2'de ise havanın ve yakıtında reküperatörler ile ısıtılarak yanma için püskürtüldüğü gaz türbinli rekuperatorlü kojenerasyon sisteminin genel şeması verilmiştir.



Şekil 2. Gaz türbinli rekuperatorlü kojenerasyon sisteminin genel şeması.

KOJENERASYON TESİSLERİNİN TERMODİNAMİK VE PERFORMANS ANALİZİ

Kojenerasyon cihazları farklı cihazlardan meydana gelmekte ve bu cihazlarda iş akışkanının kimyasal kompozisyon, sıcaklık ve basınç, değişiklikleri olmaktadır. Yanma odasında yanma dediğimiz kimyasal reaksiyon olmaktadır. Çevrimin termodinamik modelinde yapılan ön kabuller; ideal gaz yasaları metan, hava ve egzozda geçerli kabul edilmiş, yanmanın tam yanma olduğu ve NOx oluşmadığı farz edilmiştir. Yanma odasında ısı kaybı, metan LHV değerinin %2 kadarı olup, diğer cihazlarda ısı kaybı meydana gelmemektedir. Ayrıca sistemde kinetik ve potansiyel enerjilerin etkisinin olmadığı kabulü yapılmıştır [17, 18, 19].
Açık sistemde ve kararlı rejimde termodinamiğin 1. Kanunu;

$$Q_{12} + W_{12} = E_2 - E_1 \quad (2.1)$$

Sürekli rejimde kütlenin korunumu yasası;

$$\sum m_g = \sum m_{ç} \quad (2.2)$$

İş akışkanının iç enerji ve entalpisi doğrudan ölçülebilen basınç, sıcaklık ve özgül hacim gibi değişkenleri denklemlerden bulunur. İdeal gazlarda sabit hacimdeki ve sabit basınçtaki özgül ısılar;

$$c_v = (\partial u/\partial T)_v \tag{2.3}$$

$$c_p = (\partial h/\partial T)_p \tag{2.4}$$

Böylece

$$c_{v_0} = du/dT \tag{2.5}$$

$$c_{p_0} = dh/dT \tag{2.6}$$

Yazılır [6, 9]. Yani ideal gazın sabit basınç ve sabit hacimde özgül ısısı yalnızca sıcaklığın fonksiyonu aralarındaki bağıntı;

$$c_{p0} - c_{v_0} = R \tag{2.7}$$

ve R gaz sabiti, evrensel gaz sabitinin ($\overline{R}$) ilgili maddenin mol kütlesi değerine bölünmesi ile bulunur;

$$R = \overline{R}/M \tag{2.8}$$

Birim kütle için enerji ile entalpinin ideal gaz sıcaklığı ile olan bağıntısı;

$$u_2 - u_1 = \int_1^2 c_{v0}\, dT \tag{2.9}$$

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 c_{p0}\, dT \tag{2.10}$$

buradan,

$$\sum_C \dot{Q} - \sum_C \dot{W} = \Delta H \tag{2.11}$$

$$\Delta H = \sum_{çık.} \dot{n}h - \sum_{gir.} \dot{n}h \tag{2.12}$$

Yazılır [9, 11]. Yanma reaksiyonu

$$\overline{\lambda}\, CH_4 + (0.7748\, N_2 + 0.2059\, O_2 + 0.0003\, CO_2 + 0.019\, H_2O \rightarrow (1 + \overline{\lambda})(X_{N2}N_2 + X_{O2}O_2 + X_{CO2}CO_2 + X_{H2O}H_2O)$$
(2.13)

Kullanılan hava kütlesinin teorik (stokyometrik) hava miktarına oranı hava fazlalık katsayısı olarak tanımlanır. Yüzde fazla hava denir.

$$hfk = \frac{Gerçek\ \ hava\ \ miktarı}{Teorik\ \ hava\ \ miktarı} \tag{2.14}$$

Yakıtın LHV değeri;

$$LHV=\Sigma n_g h_g-\Sigma n_ç h_ç=\{(h_f+h_ç)_{N2}+(h_f+h_ç)_{CO2}+(h_f+h_ç)_{H2O}\}_{çıkan}-\{(h_f)_{CH4}+(h_f+h_g)_{N2}+(h_f+h_g)_{O2}+(h_f+h_g)_{CO2}+(h_f+h_g)_{H2O}\}_{giren}$$
(2.15)

formasyon oluşum entalpi denklemi

$$h = \Delta h_{oluş.} + \int_{T_0}^{T} c_p.dT \tag{2.16}$$

Gaz karışımlarının özellikleri onu meydana getiren gazların miktar ve özelliklerine bağlı olup, karışanın mol sayısı olan n_i'nin, toplam mol sayısı olan n'e oranına, mol oranı (y_i) denir [6, 9, 11].

$$y_i = \frac{n_i}{n} \tag{2.17}$$

Bir karışanın kütle miktarının karışanların toplam kütlesine oranı kütle oranı olarak adlandırılır.

$$y_{m_i} = \frac{m_i}{m} \tag{2.18}$$

Mol oranı ve kütle oranı arasındaki denklemler;

$$y_{m_i} = y_i \frac{M_i}{M_{kar}} \tag{2.19}$$

veya

$$M_{kar} = \sum y_i . M_i \tag{2.20}$$

Gaz karışımının Mol oranları biliniyorsa kütle oranları;

$$\frac{1}{M_{kar}} = \sum \frac{y_{m_i}}{M_i} \tag{2.21}$$

Karışımın gaz sabiti ve molar özgül ısısı;

$$R_{kar} = \sum y_{m_i} . R_i \tag{2.22}$$

$$\overline{c_{p0}} = \sum y_i . \overline{c_{p0_i}} \tag{2.23}$$

$$\overline{c_{v0}} = \sum y_i . \overline{c_{v0_i}} \tag{2.24}$$

Isı değiştiricileri için etkinlik;

$$\varepsilon = \frac{T_{soç} - T_{sog}}{T_{sıcg} - T_{sog}} \tag{2.25}$$

T sisteminin sınır sıcaklığı, sonsuz küçük bir hal değişimi için sistemle çevrenin ısı alışverişinde tersinir hal değişiminde entropinin değişimi;

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\partial Q}{T}\right)_{tr} \tag{2.26}$$

Isı alışverişi sıfırsa (tersinir adyabatik hal değişimi) entropi değişimi de sıfır olmakta ve entropi sabit kalmaktadır [6, 9, 11].

$$S_2 - S_1 = 0 \tag{2.27}$$

İdeal gazlarda molar olarak entropi değişimi;

$$d\overline{s} = \frac{\overline{c}_{v0}(T)}{T} dT + \overline{R} . \frac{dv}{v} \tag{2.28}$$

$$d\overline{s} = \frac{\overline{c}_{p0}(T)}{T} dT + \overline{R} . \frac{dP}{P} \tag{2.29}$$

İntegrasyonla bu mol cinsinden entropi değişimi;

$$\overline{s}(T_2, P_2) - \overline{s}(T_1, P_1) = \int_1^2 \frac{\overline{c}_{p0}(T)}{T} dT - \overline{R}\, ln \frac{P_2}{P_1}$$
(2.30)

$$\overline{s}(T_2, v_2) - \overline{s}(T_1, v_1) = \int_1^2 \frac{\overline{c}_{v0}(T)}{T} dT + \overline{R}\, ln \frac{V_2}{V_1}$$
(2.31)

Özgül ısıların ortalama sıcaklıktaki sabit durumda olduğu farz edilirse;

$$k = \frac{c_{p0}}{c_{v0}} \tag{2.32}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} \tag{2.33}$$

$$P.v^k = T.v^{k-1} = T.P^{\frac{(1-k)}{k}} \tag{2.34}$$

Bir kontrol hacminden ya da kontrol kütlesinden elde edilebilecek en fazla iş, verili bir halden itibaren tersinir bir hal değişimiyle çevresiyle termodinamik denge (ölü hale) haline getirildiğinde elde edilebilen iştir. Bu işe ekserji denmektedir. Fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki bileşeni vardır. İdeal gaz karışımında fiziksel ekserji mol cinsinden şeklindeki denklemi;

$$E_{fiz} = (\overline{h} - \overline{h_0}) - T_0.(s - s_0) = \int_{T_0}^{T} \overline{c}_{p0}(T)dT - T_0.\left(\int_{T_0}^{T} \frac{\overline{c}_{p0}(T)}{T} dT - \overline{R}\, ln \frac{P_i}{P_0}\right) \tag{2.35}$$

$$E_{fiz} = (\overline{h} - \overline{h_0})_{kar} - T_0.(s - s_0)_{kar} = \sum_i y_i \left[\int_{T_0}^{T} \overline{c}_{p0i}(T)dT - T_0.\left(\int_{T_0}^{T} \frac{\overline{c}_{p0i}(T)}{T} dT - \overline{R}\, ln \frac{P_i}{P_0}\right)\right] \tag{2.36}$$

Kimyasal ekserjide ise, referans bir haldeki (T0, P0) bir kütlenin çevresiyle kimyasal bileşik yönünden termodinamik denge durumuna gelirken elde edilebilecek en büyük yararlı iştir. Bir maddenin kimyasal yapısı, diğer maddelerden farklı olup, kimyasal ekserjisi de farklıdır [6, 9, 11].

.

$$E_{fiz} = (\overline{h} - \overline{h_0})_{kar} - T_0.(s - s_0)_{kar} = \sum_i y_i \left[\int_{T_0}^{T} \overline{c}_{p0i}(T)dT - T_0.\left(\int_{T_0}^{T} \frac{\overline{c}_{p0i}(T)}{T} dT - \overline{R}\, ln \frac{P_i}{P_0}\right)\right]$$

(2.37)

Bir akış (kontrol kütlesi) toplam ekserjisi;

$$\overline{E} = \overline{E}_{fiz} + \overline{E}_{kim} \tag{2.38}$$

Giren-çıkan kütle miktarlarının birbirine eşit olduğu açık sistemlerde ekserjinin denklemi;

$$\sum_i m_i h_i - \sum_i T_0 s_i - \sum_j m_j h_j + \sum_j T_0 s_j + \sum Q_k - T_0 \sum \frac{Q_k}{T_k} - W = E_{kayıp}$$

(2.39)

Bir sistemin ikinci yasa verimi kazanılan ekserjinin harcanan ekserjiye oranı olup denklemi;

$$\eta_{ekver} = \frac{Elde \quad edilen \quad ekserji}{Harcanan \quad ekserji} \tag{2.40}$$

Kojenerasyon sistemlerinin performans analizi zor ve karmaşık olup, sistemin tümü için olabildiği gibi, sistemdeki her bir cihaz için olmak üzere iki farklı değerlendirme şeklinde yapılabilmektedir. Bir cihazın performansı tüm tesisin de performansına etki edeceğinden bu iki çalışma bazı durumlarda gerekli olabilir. Kojenerasyon sistemlerinin performansını görmek için tüm sistemin ürünleri ve cihazların güçleri görülmelidir. Bir kojenerasyon çevriminin performansını gösteren en önemli parametreler (konstrüksiyonla ilgili olanlar hariç) tüm sistemin gücü, alınan havanın miktarı, ısı oranı, verimler ve özgül ısılar şeklinde sayılabilir.

Tek tek cihazlar için bilinmesi gereken parametrik değerler, kompresör için verim, harcadığı enerji, enerji kayıpları, havanın giriş sıcaklığı, basıncı ve nemliliğidir. Yanma odası göz önüne alındığında verim, giriş-çıkış sıcaklığı, yakıt tüketimi olup, türbin göz önüne alınırsa verim, ürettiği güç, enerji kayıpları ve giriş-çıkış basınçlarıdır. Isı değiştiricisinde ise, etkinlik, giriş-çıkış sıcaklıkları, giriş-çıkış kütleleri ve giriş-çıkış enerjileridir. Reküperatörler içinse etkinlikler, verimler ve giriş-çıkış sıcaklıkları önemlidir [6, 9, 11].

Üretici firmalar çok olduğundan ve çeşitlerinin de fazla olması nedeniyle standart bir seçim metodu yoktur. Fakat seçimde ve sistem tasarımında en temel işletme, termodinamik, ekonomik ile termo-ekonomik faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Termodinamik faktörlerin başında üretilecek elektrik miktarı için harcanacak yakıt miktarıdır. Her durum için çevrimin kayıpları görülmelidir. Kojenerasyon sisteminin kurulacağı yerin denizden yüksekliği, atmosfer sıcaklığı, havanın nem oranı, yakıt çeşidi ve bileşimi gibi çevre ile ilgili faktörler bilinmelidir. Tesisin termodinamik performansında genel verim, tesisten kazanılan net iş ile kazanılan faydalı ısı enerjisi toplamının tesise harcanan yakıtın enerjisine oranı olarak tanımlanır [6, 9, 11].

$$\eta = \frac{W+Q_{buh.}}{Q_{BESLEN.}} \tag{2.41}$$

Elektrik verimi de çevrimden üretilen işin, harcanan yakıtın enerjisine oranıdır. Isı verimi de çevrimden kazanılan ısının enerjisinin beslenen yakıt enerjisine oranıdır.

$$\eta_{elek} = \frac{W}{Q_{BESLEN.}} \tag{2.42}$$

$$\eta_{ısıl} = \frac{Q_{buh}}{Q_{BESLEN.}} \tag{2.43}$$

Elektrik ısı oranı;

$$EIO = \frac{\dot{W_{net}}}{Q_{net}} \tag{2.44}$$

Özgül iş birim kütleden elde edilen iştir.

$$Ozgul\ iş = \frac{\dot{W_{net}}}{m_{eg}} \tag{2.45}$$

Z faktörü kayıp ekserjinin faydalı ekserjiye oranıdır;

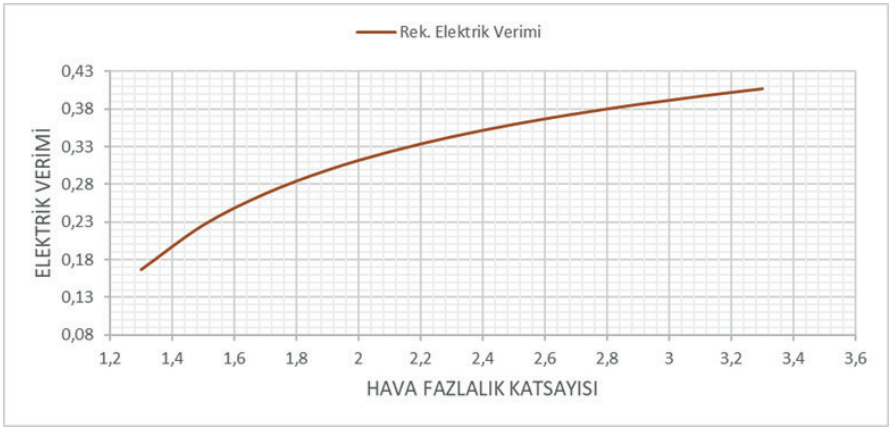
$$Z = \frac{Q_{BESLEN.}-(W+E_{NET})}{W+E_{NET}} \tag{2.46}$$

BULGULAR VE TARTIŞMA

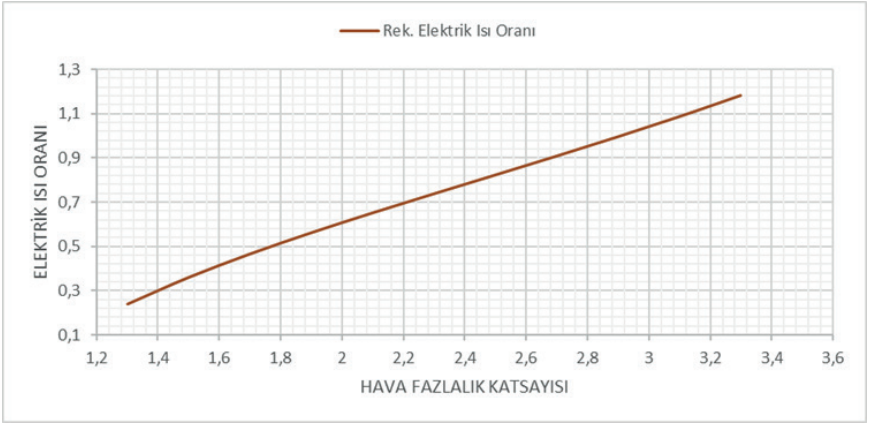
Bu çalışmada yapılan hesaplamalarda normal atmosfer koşulları, T_0 = 298.15 K ve P_0 = 101.3 kPa olarak alınmıştır. Basınç kaybı sadece yanma odasında olduğu farz edilerek %5'tir. Kompresör giriş-çıkış kütlesel debisi m_1=91,4 kg/s, giren yakıt debisi m_f=1.64 kg/s, ısı eşanjörü doymuş buhar basıncı 2.000 kPa, gaz türbininin net elektrik gücü 30000 kW'tır. Normal çalışma şartlarında kompresyon oranı r=P_2/P_1=10 alınmış olup, kompresör izentropik ve türbin izentropik verimleri (η_{sc}=0,86), (η_{st}=0,86), maksimum kompresyon oranı (P_2/P_1<=16) olup, türbinin maksimum giriş sıcaklığı $T_{ÇYO}$<1550 K, alınmıştır (Bejan ve diğ., 1996). Havanın bileşiminde mol yüzdesi ile % 77.48 N_2, % 20.59 O_2, % 0.03 CO_2, % 1.9 H_2O(g) alınmıştır. Atık ısı geri kazanım cihazına su giriş sıcaklığı T_{HRSG}=298.15 K, yakıt püskürtme basıncı $P_{yakıt}$=1200 kPa, T_{buhar}=485,57 K ve $T_{bacasıc}$=426 K alınmıştır [6, 9, 11].

Şekil 3'te reküperatörlü kojenerasyon tesisinde elektrik veriminin hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi verilmiştir. Hava fazlalık katsayısının değerinin 1.3'ten 3.3'e çıkarılması ile elektrik üretim verimi sabit yakıt debisi için ve kompresyon oranı 10 için %17'den %41'e çıkmaktadır. Elektrik üretimi veriminde artış %141 civarında olup bu değişimin ciddiye alınması gereklidir. Hava debisinin artması ile gaz türbininden geçen kütle miktarı artmakta bu da elde edilen iş miktarını artırmaktadır.

Şekil 4'te reküperatörlü kojenerasyon tesisinde elektrik-ısı oranının hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi sabit yakıt kütlesel debisi için havanın kütlesel debisi arttırıldığında elde edilen elektrik miktarı artmakta ve elde edilen ısı miktarı (fazla hava yanma odası çıkış sıcaklığını düşürmekte ve bu yüzden türbinden çıkan egzoz enerjisinin rekuperatörlerde daha fazla harcanmasına yol açmaktadır) azalmaktadır. Artış miktarı 12 kat civarındadır.



Şekil 3. Reküperatörlü kojenerasyon tesisinde elektrik veriminin hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi.

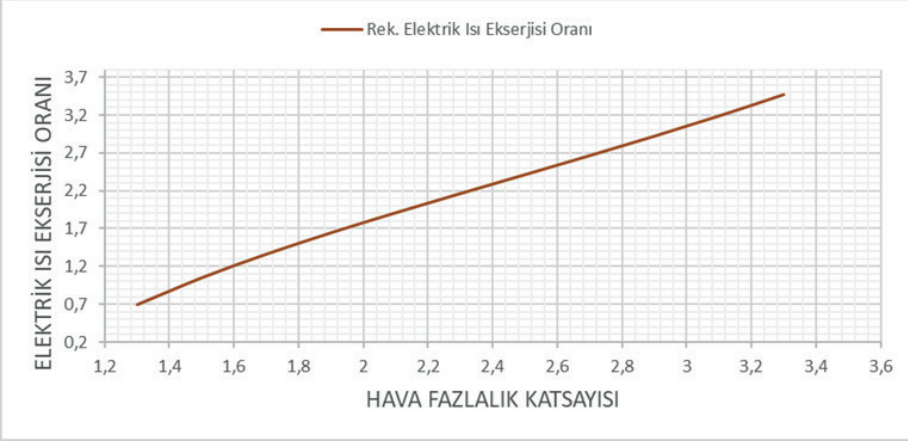


Şekil 4. Reküperatörlü kojenerasyon tesisinde elektrik ısı oranının hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi.

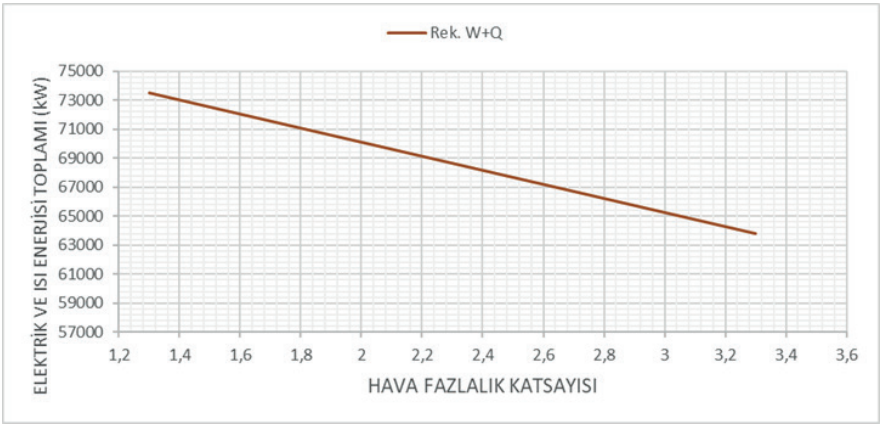
Şekil 5'te reküperatörlü kojenerasyon tesisinde elektrik-ısı ekserjisi oranının hfk-hava fazlalık oranının ile değişimi verilmiştir. Isı ekserjisi ısının bulunduğu sıcaklıkla alakalı olduğundan ve ısıdan elde edilebilecek faydalı iş Carnot verimi ile sınırlandığından ısı enerjisi ile ısı ekserjisi farklıdır. Elektrik-ısı ekserjisi oranı hfk-hava fazlalık katsayısı arttıkça artmakta bu da sabit yakıt kütlesel debisi için artırılan hava debisinin elektrik üretimine katkısı bulunmakta olduğu görülmektedir. Elektrik-ısı ekserjisi oranı yaklaşık beş kat artmaktadır.

Şekil 6'da reküperatörlü kojenerasyon tesisinde elektrik ve ısı enerjisi toplamının hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi verilmiştir. Yakıtın kütlesel debisi sabit tutularak verilen hava kütlesi artırıldığında elde edilen elektrik ve ısı toplam enerjisi düşmektedir. Bunun sebebi artan hava debisini kompresörde sıkıştırmak için daha fazla iş harcanmakta ve hava rekuperatöründe artan hava debisini belli bir sıcaklığa kadar ısıtmak için daha fazla ısı enerjisi harcandığından daha az buhar üretilmektedir. Üretilen enerjideki azalış %13-14 dolayındadır.

Şekil 7'de reküperatörlü kojenerasyon tesisinde elektrik ve ısı ekserjisi toplamının hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi ısı enerjisi ve ısı ekserjisi farklıdır. Tesisin elektrik ve ısı ekserjisi toplamı verilen sabit yakıt debisine rağmen hfk-hava fazlalık oranı arttıkça artmakta ancak bu artış hfk'nin 3.2 civarında olduğu oranlarda durmakta ve eğri düz bir hal almaktadır. Bu da bize maksimum toplam ekserji için hfk'nin 3.2 civarında olması gerektiğini göstermektedir. Sabit yakıt debisinde havanın kütlesel debisi arttığında üretilen elektrik enerjisi artmakta, ancak ısı ekserjisi düşmektedir. Elektrikteki artış ısı ekserjisindeki azalıştan fazla olduğu için üretilen toplam ekserji de artmaktadır.



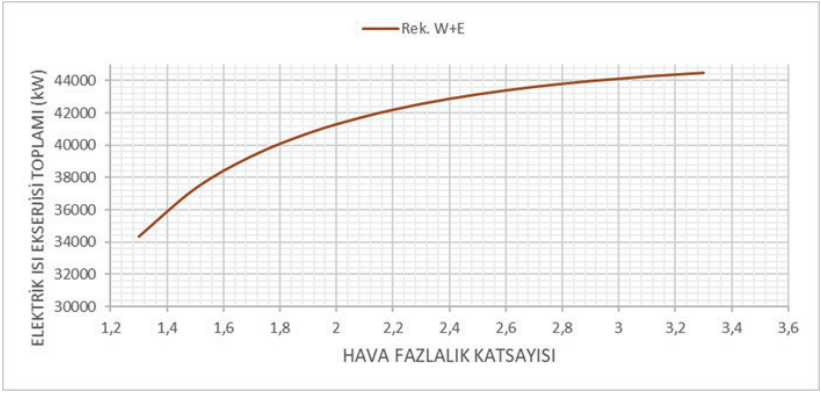
Şekil 5. Reküperatörlü kojenerasyon tesisinde elektrik-ısı ekserjisi oranının hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi.



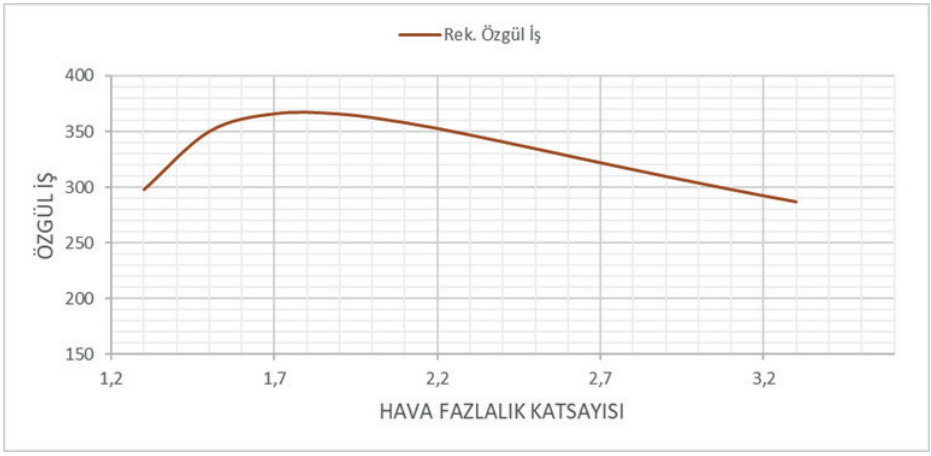
Şekil 6. Reküperatörlü kojenerasyon tesisinde elektrik ve ısı enerjisi toplamının hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi.

Şekil 8'de reküperatörlü kojenerasyon tesisinde özgül işin hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi verilmiştir. Özgül iş kullanılan iş akışkanı başına elde edilen iş olduğundan önemli bir veridir. Özgül iş hfk 1.3'ten 1.7'ye kadar artmakta ve hfk=1.7'de bir maksimum yaptıktan sonra düşüşe geçmektedir. Tesisin özgül işinin optimum noktası bu maksimum noktasıdır.

Şekil 9'da reküperatörlü kojenerasyon tesisinde Z faktörünün hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi verilmiştir. Z faktörü kaybedilen ekserjinin beslenen ekserjiye oranı olduğundan verimin tersidir. Tesise verilen yakıt miktarı sabit olup artan hfk oranlarında kayıp ekserji oranı %60'tan %47.5'lere kadar düşmekte daha sonra ise düşüş durmaktadır.



Şekil 7. Reküperatörlü kojenerasyon tesisinde elektrik ve ısı ekserjisi toplamının hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi.



Şekil 8. Reküperatörlü kojenerasyon tesisinde özgül işin hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi.



Şekil 9. Reküperatörlü kojenerasyon tesisinde Z faktörünün hfk-hava fazlalık katsayısı ile değişimi.

SONUÇLAR

Reküperatörlü kojenerasyon tesisinde hfk-hava fazlalık katsayısı birçok performans parametresini iyileştirmektedir. Elektrik verimini artırırken ısı üretimi verimini azaltmaktadır. Elektrik ısı enerjisi toplamı düşerken elektrik ısı ekserjisi toplamı artmaktadır. Elektriğin ekserjisi yani kullanılabilirliği

kendisine eşittir. Isının ekserjisi ise sıcaklığına bağlı olarak %25-55 arasında değişmektedir. Carnot veriminde de görüldüğü gibi ısının sıcaklığı arttıkça ekserjisi de artmaktadır. Tesisin özgül işinin optimum olduğu hava fazlalık oranı 1.7 olarak bulunmuştur. Artan hava fazlalık oranlarında yıkıma uğrayan ekserji azalmakta ve dolayısıyla ekserji verimi de artmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] ASHRAE. (2000). *Cogeneration systems and engine and turbine drives.* ASHRAE systems and equipment handbook (SI).

[2]Karaali R., Keven, A. (2022). Evaluation of four different cogeneration cycles by using some criteria. Applied Rheology, 32;122 – 137. DOI: 10.1515/arh-2022-0128

[3]Keven, A., Karaali, R. (2022). Analysis of Some Tribological Properties of Hazelnut Oil in Gasoline engines. *Erzincan University Journal of Science and Technology*.15;75–83.

[4]Peters MS, Timmerhaus KD, West RE. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers.* Mc Graw Hill chemical engineering series. 5th ed.

[5]Keven, A. (2023). Exergy Analyses of Vehicles Air Conditioning Systems for Different Refrigerants. International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 9; 20 – 28. DOI: 10.22399/ijcesen.1258770

[6]Moran JM, Tsatsaronis G. (2000). *The CRC handbook of thermal engineering.* CRC Press LLC.

[7]Wilkinson, B.W., Barnes, R.W.(1993).*Cogeneration Of Electricity And Useful Heat.* CRC Pres,

[8]Karaali, R., Keven, A. (2022). Exergy Analysis of Inlet Air Absorption Cooling Effects on Basic Cogeneration Systems. European Journal of Science and Technology. 43;97 – 103.

DOI: 10.31590/ejosat.1199382

[9]Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. (1996). *Thermal design and optimization.* Wiley Pub.

[10]Keven, A., Öner, C. (2023.) Emission and Lubrication Performance of Hazelnut Oil as A Lubricant. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering,* 9;219 – 224. DOI: 10.22399/ijcesen.1321604

[11]Horlock JH. (1997). *Cogeneration-combined heat and power (CHP).* CRIEGER Pub.

[12]Keven, A. (2023). Exergetic performance analyses of three different cogeneration plants. Open Chemistry, 21;1 – 13. DOI: 10.1515/chem-2022-0295.

[13]Atasbak, M., Karaali, R., Keven, A. (2022). Exergy analyses of two and three stage cryogenic cycles. *Applied Rheology,* 32;194 – 204. DOI:10.1515/arh-2022-0134

[14]Karaali, R., Keven, A. (2022). Performance Analysis of Air Fuel Heating Effects on Cogeneration cycles. European Journal of Science and Technology, 43;91 – 96. DOI: 10.31590/ejosat.1199414

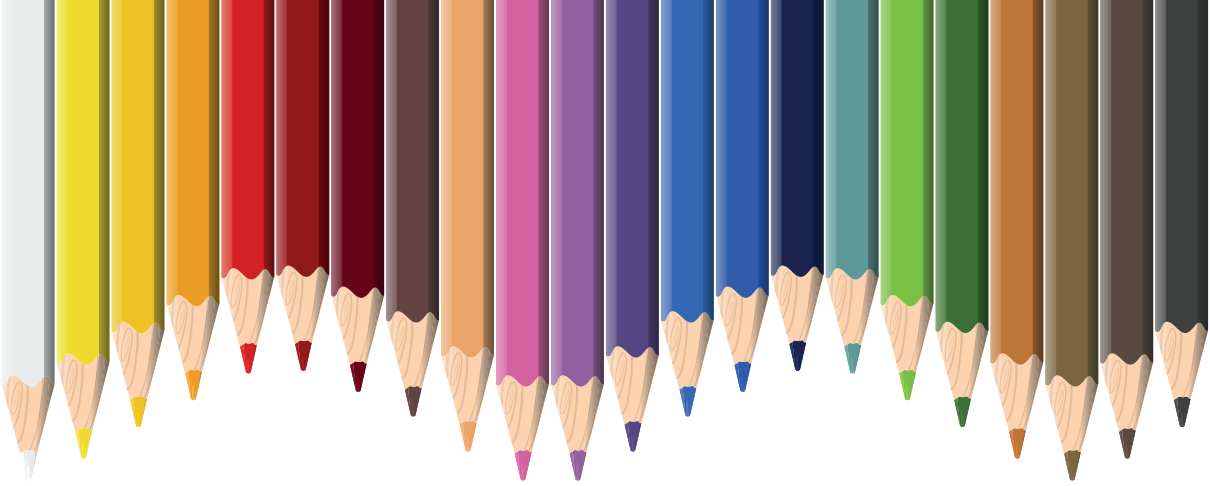
[15]Keven, A., Karaali, R. (2015). Investigation of an Alternative Fuel for Diesel Engines. *Acta Physica Polonica A*, 128(2B);282 – 286. DOI:10.12693/APhysPolA.128.B-282

[16]Keven, A. (2023). Performance analyses of detonation engine cogeneration cycles. Open Chemistry, 21;1 – 9. DOI: 10.1515/chem-2022-0313.

[17]Karaali, R., and Ozturk, I.T. (2017). Efficiency improvement of gas turbine cogeneration systems. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, 24, Suppl.1 p:21-27. DOI: 10.17559/TV-20140509154652

[18]Karaali, R., and Ozturk, I.T. (2017). Effects of Ambient Conditions on Performance of Gas Turbine Cogeneration Cycles. *J. of Thermal Science and Technology*, Volume 37 No. 1, pages 93-102.

[19]Karaali, R., and Ozturk, I.T. (2017). Performance Analyses of Gas Turbine Cogeneration Plants. *J. of Thermal Science and Technology*, Volume 37, No. 1, pages 25-33.



Bölüm 21

ÇOKLU KAVŞAK SİNYAL KONTROL MODELLEME

Ayşe Nilgün KAYADELEN[1]

1 Dr. Öğretim Üyesi Ayşe Nilgün KAYADELEN, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, ORCID ID: 0000-0002-5442-893X.

GİRİŞ

Trafik sinyalleri yoğun kavşaklarda en etkili trafik kontrol sistemidir. Farklı yönlerdeki trafik akışının neden olduğu çakışma noktaları yol işaretleri ile azaltılabilir. Trafik sıkışıklığı problemi ile ilgili en etkili yollardan biri trafik sinyal kontrolüdür. Trafik Sinyal Kontrolü, bir bölgedeki çok sayıda trafik sinyal zamanlamasını bekleme zamanlarını azaltma ve verimliliği maksimum yapma amacı ile eşzamanlı hale getiren bir sistemdir (Singh, Tripathi, & Arora, 2009).

Sinyalizasyon sistemleri kavşak kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sinyalizasyon sistemleri araç güvenliğinin, yaya güvenliğinin ve kavşak kapasitesinin arttırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ancak kötü uygulanan ve yetersiz sinyalizasyon sistemleri trafik sıkışıklığına, trafik kazalarına, uzun araç kuyruklarına, artan gecikmelere ve buna bağlı olarak trafik kurallarına uyulmamasına yol açmaktadır. Bu ve benzeri olumsuz etkilerin yaşanmaması için trafik ışıklarının doğru tasarlanması ve kavşak optimizasyonunun en iyi şekilde yapılması gerekmektedir. En sık kullanılan iki sinyalizasyon yönteminden ilki sabit zamanlı yol sinyalizasyonu, ikincisi ise trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemidir. Sabit zamanlı sinyalizasyonda devre zamanlaması ve faz sırası önceden belirlenir ve sistem sürekli olarak bu şekilde çalışır. Trafik uyarmalı sistemlerde devre zamanlaması ve faz sırası günün farklı saatlerinde trafik yoğunluğuna bağlı olarak dinamik olarak kontrol edilebilmekte ve değiştirilebilmektedir (Şimşir, Özkaynak, & Ekmekçi, 2013).

Trafik uyarmalı sistemlerin en önemli avantajı kavşaklardaki istasyonların araç yoğunluğuna göre sinyal programlarını değiştirebilmesidir. Bu sayede araç yoğunluğunun en fazla olduğu yönde trafik akışına daha fazla zaman ayrılarak kavşaktaki trafik sıkışıklığı düzenlenmektedir. Bu sinyalizasyon, kavşak yoğunluğuna göre belirlenen önemli noktalara yerleştirilen sensör sayaçlara ve bu sayaçlara bağlanan sinyal zamanlama sistemleridir.

Tam uyarmalı trafik kontrol sistemi, sinyalize kavşak sürelerini planlayarak ortalama araç bekleme süresini ve karayolu ağındaki ortalama durak sayısını en aza indirmeyi amaçlamaktadır; Bu sistem, trafik akışı, kuyruk bekleme koşulları gibi parametrelere göre optimize edilerek yeni tarifelerin gerçek zamanlı olarak uygulandığı fonksiyonel bir sistemdir.

Tam uyarmalı trafik kontrol sistemi, bir yol ağındaki ortalama taşıt gecikme sürelerini ve ortalama durma sayılarını en aza indirmek amacıyla, sinyalize kavşakların plan sürelerinin; oluşan trafik hacmi, kuyrukta bekleme gibi parametrelere göre optimize edilerek yeni sürelerin gerçek zamanlı olarak uygulandığı bir çalışma sistemidir.

Kavşaklarda sinyal çalışması için uygun koşullar yaratmak amacıyla trafik uyarı sinyal kontrol sisteminin geliştirilmesi konusunda birçok bilimsel çalış-

ma yapılmıştır. Çalışmalarda çoğunlukla yapay sinir ağları ve bulanık mantık ile sistem tasarımı yapılmıştır.

Kent içi karayolu ulaşım sistemi, fonksiyon açısından canlı organizmaların dolaşım sistemine benzetilebilir. Dolaşım sistemindeki bozukluklar nasıl tüm organların sağlıklı çalışmasını olumsuz etkiliyorsa; karayolu trafik sorunları şehirlerin sağlıklı ekonomik ve sosyal yaşamını da olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle şehir içi karayolu trafiğinin sağlıklı bir yapıya kavuşturulması zorunludur. Bu bağlamda trafik planlamasının yanı sıra akılda tutulması gereken bir diğer konu da trafik kontrolüdür. Günümüzde trafiği kontrol etmek amacıyla geleneksel trafik kontrol tekniklerinin yanı sıra gelişmiş trafik kontrol teknikleri de kullanılmaya başlanmıştır. Bu tekniklerin önemli bir kısmı yapay zekâ (AI) tekniklerini içermektedir (Akbaş, 2003).

Tek bir kavşak üzerinde uyarmalı trafik kontrol problemi ile toplam bekleme zamanı, duran özel araç ve toplu taşıma sayıları gibi kriterler 'Çok Amaçlı Karmaşık Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli' ile minimize edilebilmektedir (Dujardin, Vanderpooten, & Boillot, 2015).

Tekli kavşaklarda çoklu modelli gerçek zaman trafik kontrol stratejisini serbest trafik akışı, çevre ve rahatlık açısından ele alan birçok kriterin optimizasyonu yeni bir 'Karmaşık Tamsayılı Doğrusal Programlama' formülasyonu ile önerilmiştir. Yaklaşımın orijinalliği, her zaman birimindeki trafik ışık evreleri yerine trafik ışıklarının değişme zamanlarını göz önünde bulundurmasıdır (Dujardin, Vanderppoten, Boillat, & Vinant, 2011).

Hücre aktarmalı 0-1 karmaşık tamsayılı doğrusal programlama problemi olarak formüle edilmiş trafik sinyal problemini çözmek için üç sezgisel çözüm algoritması ortaya konulmuştur. Bu üç yaklaşım ile optimale çok yakın çözümler ortaya çıkmıştır (He, Lin, Liu, & Head, 2010).

Trafik tıkanıklığının çözümü için ileri sabit zamanlı trafik sinyal kontrol sisteminin stokastik trafik durumunu temsil eden bir matematiksel model geliştirilmiştir. Sinyalizasyonun optimum çözümü için genetik algoritma modeli önerilmiştir. Sonuçta, modelin simülasyonu ile sistem performansı değerlendirilmiştir (Ezzat, Khaled, El-Kilany, & Abdelmoneim, 2014).

Trafik kontrol problemi için gecikme minimizasyonu ve kapasite maksimizasyonunun aynı zamanda çözümü için hibrit bir optimizasyon algoritması ortaya konulmuştur. Önerilen 'Konjuge Gradient' yöntemi ile gecikme minimizasyonu etkili biçimde çözülebilmektedir. Gecikme minimizasyonu ve kapasite maksimizasyon probleminin birlikte çözümü için geliştirilen yeni tür hibrit sezgisel yöntem ile etkili bir çözüm sunulmuştur (Chiou, 2007).

Her bir kavşaktaki trafik sinyalizasyon zamanlamasını optimize etmek için toplam bekleme zamanı ve yaya gecikmesini minimize eden yeni, çok amaçlı bir matematiksel model ortaya konulmuş, çözüm için bulanık teori-

si kullanılmıştır. Problem, genetik algoritma ve ortaya atılan yeni bir yöntem olan sayısallaştırılmış sonuçları bulanık mantık formunda üreten süreç yönetimi ile çözülmüştür (Mohan & Lourds, 2013).

Trafik sistemlerinin gelişimi ve tasarımının desteklenmesinde trafik analizinde en çok kullanılan yaklaşımlarından biri olan akıllı taşıma sistemlerinin gelişimi, trafik simülasyonunu teşvik etmektedir. Bulanık mantığa dayalı trafik yönetim sisteminin geliştirilmesi ve test edilmesi için bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Bulanık mantık sisteminin performansının girdi/çıktı değişkenlerinin yapılandırılmasından etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır (Taha & İbrahim, 2012).

İzole kavşaklarda otobüs öncelikli trafik sinyal kontrolü için sezgisel bir algoritma ortaya konulmuştur. Bu sezgisel algoritma optimale yakın bir sinyal zamanlaması ile başarılı olmuştur. Otobüs öncelikli sinyal için mikroskobik trafik simülasyonu, sezgisel ile uygulama durum algoritmalarını karşılaştırmak için kullanılmıştır (He, Head, & Ding, 2014).

Trafik sıkışıklığında trafik ışıklarının zamanlaması simülasyon kullanılarak optimize edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada, ExtendSim simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Simülasyonla birlikte araçların sistemdeki toplam zamanını minimize etmek amacı ile optimum ya da optimuma yakın sonuç elde etmek için optimizasyon kullanılmıştır (Ezzat, Khaled, El-Kilany, & Abdelmoneim, 2014)

Şehirlerin trafik sinyalizasyon zamanlaması non-konveks doğrusal olmayan programlama problemidir. Bu tip bir problemin ele alındığı çalışmada, optimal çözüm için genetik benzeri bir algoritma kullanılmıştır. Bu algoritmada yeni çözümler üretmek için sezgisel anlayışlar takip edilmektedir. Amaç fonksiyonu çok hızlı bir makroskobik simülatör olan General Link Transmission modeli ile geliştirilmiştir (Gentile & Tiddi, 2009).

Bir diğer çalışmada, koordine uyarmalı sinyal kontrol sistemleri ve sinyal öncelikli kontrol sistemleri arasındaki çelişen durumlar ele alınmıştır. Önerilen sistemde, v2i iletişim altyapılı araçla, öncelik hakkı olan araçlar, örneğin; acil araçları, transit otobüsler, ticari kamyonlar ve yayalar trafik sinyal kontrol ediciye öncelik mesajları için istek gönderebilmektedir. Aynı anda birden çok istek olabilir. Çalışmada bu sistem, İsteğe Bağlı Karmaşık Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli ile formüle edilmiştir. Modelde sinyal koordinasyonu sağlanamadığında amaç fonksiyonuna bir ceza eklenmektedir. Önerilen kontrol yöntemi mikroskobik trafik simülasyonu kullanılarak transit sinyal önceliği uygulama durumu ile karşılaştırılmıştır (He, Lin, Liu, & Head, 2010).

Günümüzde sinyalize kavşaklarda, duran hat dedektörleri en yaygın trafik veri toplama teknolojilerinden biridir. İzole ve tam doymamış kavşaklarda, duran hat dedektörleri ve sondaj araçlarından elde edilen zaman ve yer bil-

gilerine ait verilerin birleştirilmesi ile kuyruk uzunluklarının gerçek zamanı tahmin edilebilmektedir. Çalışmada, basit istatistiksel prensiplerin nokta tahmininin kullanımı ile beklenen kuyruk uzunluğu ve kırmızı ışık aralığı sonundaki varyansı için analitik modellller geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin doğruluğu mikroskobik simülasyon yazılımı-VISSIM kullanılarak karşılaştırılmıştır (Comert, 2013).

Bu çalışmada, trafik akışının Weidmann araç takip modelini temel alan mikroskobik bir model kullanılarak simüle edildiği VISSIM simülasyon ortamında, sinyalize kavşaklarda dinamik sinyal optimizasyon modeli kullanılarak elde edilen performans iyileştirmeleri sunulmaktadır (Akbaş, 2003).

Sinyalize kavşaklar için gerçek zaman uyarmalı kontrol modelinin önerildiği çalışmada, mevcut uyarmalı sinyal kontrol sisteminin performansını geliştirmek için mevcut sisteme uygulanabilen uyarmalı bir sinyal kontrol modeli ortaya konulmuştur. Bu model, gelecek geliş oranlarını tahmin eden bir akış tahmin süreci içermektedir. Sinyal kontrol parametreleri bu tahmin edilen talepleri karşılamak için döngü başına dinamik olarak optimize edilmektedir. Sistem özellikle yoğun olmayan zaman periyotlarında uygulanmıştır. Önerilen model, mikro simülasyon ile test edilmiş, orta yoğunluklu trafik durumunda model performansı en iyi olarak bulunmuştur (Recker, Zheng, & Chu, 2008).

Gecikme, kavşak sinyal zamanlamasının optimize edilmesinde ve kavşakta bekleyen araç yoğunluğunun belirlenmesinde en önemli faktörlerden biridir. Çalışmanın odak noktası kavşaklardaki trafik ışıklarının sinyal verme süresini ve araç yoğunluğunu araştırmaktır. Yavaşlamanın belirlenmesine yönelik geleneksel yöntemler, yoğun kavşaklarda ihtiyaç duyulan çözümleri bulmak için yetersizdir. Bu durum trafik ışığı sistemlerinin tasarımında trafik hacminin, trafik ışığı bekleme süresinin ve sırada bekleyen ortalama araç sayısının önemli parametreler olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, model için ortalama trafik hacmi, kırmızı ışıkta bekleme süresi ve kuyrukta bekleyen araç sayısı verilerini kullanarak kavşaklarda optimum trafik ışıklarının oluşturulmasına yönelik gözlemler ve çözümler sunmakta ve çözüm bulmanıza yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Çalışma sonucunda dört faz kontrollü bir kavşağın sinyal modeli simülasyonu görsel olarak tasarlanmış ve C# programlama dili kullanılarak kodlanmıştır (Şimşir, Özkaynak, & Ekmekçi, 2013).

Trafik sisteminin iki etmeni olan seyahat edenler ve trafik işaretleri arasındaki etkileşimin etmene dayalı simülasyonu üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma ile, kuyruk modellerinin sinyalize kavşaklarda trafik akışı ve sinyalize kavşaklarda oluşan sarmal trafik tıkanıklığının modellenmesinde nasıl kullanıldığı gösterilmiştir. Sinyalize kavşakların modellenmesi MATSim ile yapılmıştır. Kavşak bölgelerinde oluşan sarmal trafik tıkanıklığının doğru şekilde yansıtılması için mikroskobik simülasyon önemlidir. Önerilen birleşik

kuyruk modeli, sinyalize kavşaklarda trafik akışını yansıtmaktadır (Grether, Neumann, & Nagel, 2012).

Çalışmada, aşırı trafik yoğunluğu problemini hafifletmek için trafik uyarmalı sinyalizasyon tasarısı geliştirilmiş ve test edilmiştir. Sinyalizasyon çalışması, dinamik programlama ile kontrol edilen trafik dinamiklerinin durum uzayı gösterimine (state-space representation) dayandırılmıştır. Gerçekleştirme maliyetlerini minimize etmek için, her bir bağlantıda sadece bir döngü dedektörü kabul edilmektedir. Optimal sabit zamanlı trafik kontrolüne karşı önerilen sistemin karşılaştırmaya dayalı avantajları bu çalışma aracılığıyla vurgulanmıştır. Sonuçlar, farklı kavşaklara uygulandığında sistem esnekliğini gösterecektir. Başka bir ifadeyle, önerilen dinamik trafik kontrol edicinin değişen trafik şartlarına, büyük ölçüde, kavşak trafik minimizasyonuna uyum sağlayabileceğini göstermektedir (Borg & Scerr, 2014).

Sinyal kontrollü bir kavşak, yalnız araç gecikmelerini değil aynı zamanda aynı bölgedeki araç egzoz salınımını ve yakıt tüketimini de arttırır. Bu nedenle, bir sinyal kontrollü kavşak optimizasyon yöntemi, araç egzoz salınımını, yakıt tüketimini azaltmayı ve ağırlıkla istenen araç gecikmelerini hedefler. Bu amaçla, bir kavşakta çok amaçlı sinyal kontrol yöntemi önerilmiştir. Optimizasyon yöntemi, paramiks mikroskobik trafik simülasyon yazılımı, CMEM (Comprehensive Modal Emission Model) ve genetik algoritmayı birleştirmiştir. Sonuçlar, genetik algoritmaya dayalı çok amaçlı optimizasyonun etkili olduğunu göstermektedir (Zhou & Cai, 2014).

Trafik ağı dinamiklerine dayalı gerçek zamanlı bilgi ile eş zamanlı sinyal plan tasarımı ve sinyal zamanlama optimizasyonunu içeren trafik sinyal kontrolü için bir yöntem ortaya atılmıştır. Kullanılan bu yaklaşım, kritik yol, çevrim süresi ve yeşil ışık bölümü her muhtemel sinyal tasarımı için gruba bağlı Akçelik Yöntemidir. Sinyal plan tasarım seçimi toplam gecikmeyi minimize etmek için formüle edilmiştir. Sonuç algoritması Java'da kodlanmış ve izole sinyalle kontrol edilen bir kavşakta otomatik sinyal ayarlama değişimine izin veren Aimsun's API'ye dinamik olarak bağlı Tra SMAPI kullanılmıştır. Çalışma, sinyal plan tasarımı ve sinyal zamanlama bütünleşik tasarım gelişimine katkıda bulunmaktadır. Önerilen yöntem, farklı trafik ağlarında uygulanması için etkili biçimde genel olmayı hedeflemektedir (Vilarinho & Tavares, 2014).

Trafik sıkışıklık problemi için, simülasyon modeli ile birleştirilmiş dinamik ve otomatik uzman sistem trafik ışık kontrol sistemi önerilmiştir. Trafik probleminin analizinde Arena programı kullanılmıştır. Model, gelen ve ayrılan araç sayısını simüle etmek için gelişler ve ayrılışlararası süreyi kabul eder. Toplanan verilere, simülasyon modelinden üretilen en iyi, ikinci ve üçüncü trafik ışık sürelerine göre otomatik ve dinamik uzman sistem trafik ışık kontrolü ve trafik iyileşmesi için trafik sinyallerinin sürelerinin ne kadar sürmesi gerektiği kontrol edilebilir (Wen, 2008).

Çalışmada, iki şeritli dört yollu bir kavşak için akıllı trafik sinyal kontrol edici bir algoritma önerilmiştir. Sensörlerden oluşan akıllı trafik sinyal kontrol edici, 4 fazlı dört yol kavşağı ve akıllı bulanık kontrol ediciye yerleştirilmiştir. Akıllı trafik sinyal kontrol edici'nin çalışması iki zamanlama moduna bağlanmıştır: yoğun ve yoğun olmayan saatler olmak üzere. Simülasyon sonucu, gelişmiş faz çizelgeleme ve yeşil ışık dağıtımı için olumlu sonuçlar göstermiştir. Analiz sonucu, sinyalize kavşaklarda oluşan gecikmeyi minimize etmekte, akıllı trafik sinyal kontrol edicilerin daha iyi olduğunu göstermiştir (Mohan & Lourds, 2013).

Çalışmada, şehirde bulunan trafik sinyal sisteminin simülasyon ve modellemesi yapılmıştır. Simülasyon modellemede Arena yazılımı kullanılmıştır. Çalışma, Arena'nın şehir trafik sinyal kontrolünün modellenmesi için tasarlanmamasına rağmen trafik sinyal sistem simülasyonunda kullanılabilirliğini göstermiştir (Salimifard & Ansari, 2013).

Trafik sıkışıklığını azaltmak ve şehir trafiğindeki kavşak kapasitesini arttırmak için, Monte Carlo algoritmasına dayalı kuyruk teorisi ile kavşaklar için araç kuyruk sisteminin modeli kurulmuştur. Kavşaktaki simülasyon ve araç kuyruk sistemi analizi MATLAB ile yapılmıştır. Araç çalışma şartları için optimal kuyruk tasarım teorisi perspektifi, tesislerin planlaması, ergonomi ve yönetim sisteminden sağlanmıştır. Sonuçlar, analiz ve düzeltmenin araç problemini etkili şekilde hafifletebildiğini göstermektedir (Wang, Ye, Zhang, & Li, 2014).

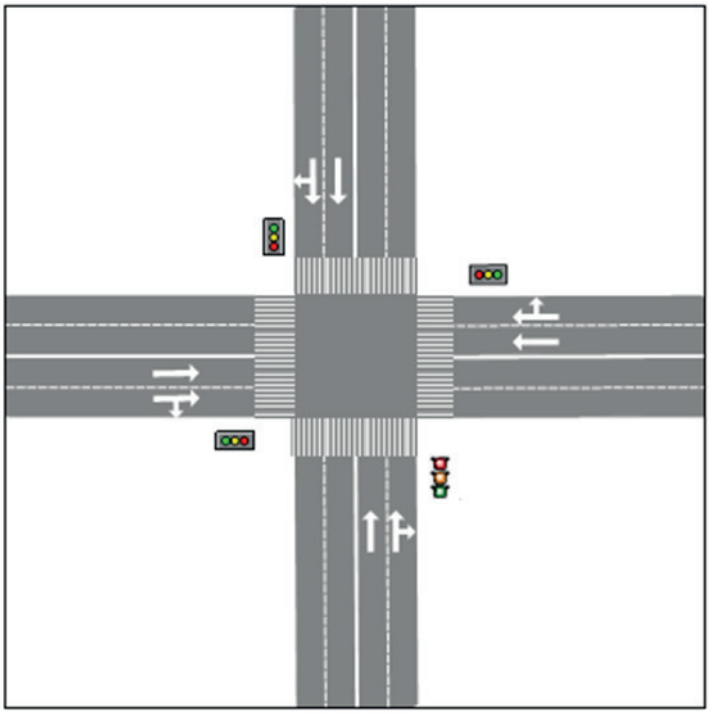
Yazar	Problem Türü	Amaç	Yöntemi
Y. Dujardin, D. Vanderpooten, F. Boillot, 2015	Uyarmalı Trafik Sinyal Kontrol	Tek bir kavşak üzerinde uyarlamalı trafik kontrol problemi ile toplam bekleme zamanı, duran özel araç ve toplu taşıma sayılarının minimize edilmesi.	Çok amaçlı karmaşık tam sayılı doğrusal programlama
A. Ezzat, Hala A. F. Khaled S. El-Kilany, A. F. Abdelmoneim, 2014	Trafik Sinyal Zamanlaması	Trafik sıkışıklığında trafik ışıklarının zamanlamasının simülasyon ile optimize edilmesi.	Simülasyon, optimizasyon, ExtendSim
A. Ezzat, Hala A. F. Khaled S. El-Kilany, A. F. Abdelmoneim, 2014	Trafik Sinyal Zamanlama Optimizasyonu	İleri sabit zamanlı trafik sinyal kontrol sisteminin için stokastik matematiksel model algortitması geliştirilmesi.	Simülasyon modelleme, matematiksel modelleme, genetik algoritma.

Q. He, K. L. Head, J. Ding, 2014	Çok Modelli Trafik Sinyal Kontrolü	Çalışmada koordine uyarmalı sinyal kontrol sistemleri ve sinyal öncelikli kontrol sistemleri arasındaki çelişen durumlar ele alınması.	İsteğe dayalı karmaşık tamsayılı doğrusal programlama
C. Vilarinho, J. P. Tavares, 2014	İzole Kavşakta Gerçek Zamanlı Sinyal Kontolü	Trafik ağı dinamiklerine dayalı gerçek zamanlı bilgi ile eş zamanlı sinyal plan tasarımı ve sinyal zamanlama optimizasyonunu içeren trafik sinyal kontrolü için bir yöntem ortaya atılması.	Akçelik yöntemi, mikroskobik trafik simülatör
D. L. Borg, K. Scerr, 2014	Trafik Uyarımlı Sinyal Kontrolü	Dinamik programlama ile ortaya atılan uyarımlı trafik kontrol sistemi ile optimal sabit zamanlı kontrolün karşılaştırması.	Dinamik programlama
Z. Zhou, M. Cai, 2014	Sinyal kontrollü çok amaçlı kavşak optimizasyonu	Sinyal kontrollü kavşak optimizasyon yöntemi ile araç egzoz salınımını, yakıt tüketiminin azaltılması ve ağırlıkla istenen araç gecikmelerinin hedeflenmesi.	Çok amaçlı optimizasyon, genetik algoritma, mikroskobik trafik simülasyonu
F. Wang, C. Ye, Y. Zhang, Y. Li, 2014	Kavşaklardaki araç kuyruk sisteminin iyileştirilmesi	Trafik sıkışıklığını azaltılması ve şehir trafiğindeki kavşak kapasitesinin arttırılması.	Monte Carlo algoritması, simülasyon, kuyruk teorisi
G. Comert, 2013	Trafik ışıklarında kuyruk uzunluğunun tahmini	İzole ve tam doymamış kavşaklarda, kuyruk uzunluklarının gerçek zamanının tahmin edilebilmesi	Mikroskobik simülasyon, VISSIM
A. Mohan, J. Lourds, 2013	Trafik sinyal çizelgeleme	Akıllı trafik sinyal kontrol edici ile sinyalize kavşaklarda oluşan gecikmenin minimize edilmesi	Akıllı trafik sinyal kontrol edici algoritma, simülasyon
N. S. Pour, H. Asadi, , M. P. Kheradmand, 2013	Bulanık çok amaçlı trafik sinyal optimizasyonu	Trafik hacmindeki dalgalanma kontrolünün optimize edilmesi	Yeni bir bulanık mantık teorisi, genetik algoritma
K. Salimifard, M. Ansari, 2013	Trafik sinyal simülasyonu, modellemesi	Arena'nın trafik sinyal sistem simülasyonunda kullanılabilirliğinin gösterilmesi	Simülasyon, Arena
D. Grether, A. Neumann, K. Nagel, 2012	Trafik kontrol simülasyonu, kuyruk model yaklaşımı	Kuyruk modellerinin sinyalize kavşaklarda trafik akışı ve oluşan trafik tıkanıklığının modellenmesinde kullanılmasının gösterilmesi	Kuyruk modeli, mikro simülasyon, MATSim

M.A. Taha, L. İbrahim, 2012	Bulanık mantığa dayalı trafik simülasyonu	Bulanık mantığa dayalı trafik yönetim sisteminin geliştirilmesi ve test edilmesi için simülasyon çalışması	Simülasyon, bulanık mantık
Y. Dujardin, D. Vanderpooten, F. Boillot, P. Vinant, 2011	Çok amaçlı ve çok modelli uyarmalı trafik sinyal kontrolü	Trafik sinyal kontrolü için yeni bir karmaşık tamsayılı doğrusal programlama önerilmesi	Çok amaçlı karmaşık tamsayılı doğrusal programlama
Q. He, W.-H. Lin, H. Liu, K. L. Head, 2010	Trafik sinyal kontrolü	0-1 karmaşık tamsayılı doğrusal programlama trafik sinyal kontrolü için sezgisel çözüm algoritmaları geliştirilmesi	Hücre aktarma modeli, sezgisel algoritmalar, lineer gevşetme
Q. He, K. L. Head, J. Ding, 2010	İzole kavşaklarda otobüs öncelikli trafik sinyal kontrolü	İsole kavşaklarda otobüs öncelikli trafik sinyal kontrolü için bir sezgisel algoritma ortaya konulması	Mikroskobik simülasyın, VISSIM, bir sezgisel algoritma
W. Recker, X. Zheng, L. Chu, 2008	Uyarmalı sinyal kontrol modeli	Mevcut uyarmalı sinyal kontrol sisteminin performansını geliştirmek için mevcut sisteme uygulanabilen adaptif bir sinyal kontrol modeli önerilmesi	Optimizasyon, mikroskobik simülasyon
W. Wen, 2008	Dinamik ve otomatik uzman sistem trafik ışık kontrolü	Trafik sıkışıklık problemi için, simülasyon modeli ile birleştirilmiş dinamik ve otomatik uzman sistem trafik ışık kontrolü için bir sistem önerilmesi	Simülasyon, Arena
S.W. Chiou, 2007	Bölge trafik kontrol problemi	Gecikme minimizasyonu ve kapasite maksimizasyonu için hibrit bir optimizasyon algoritma	Matematiksel programlama, optimizasyon, sezgisel
A. Akbaş, 2003	Dinamik Sinyal Optimizasyonu	Bir dinamik sinyal optimizasyon modelinin simülasyon ortamında değerlendirilmesi	Mikroskobik simülasyon, VISSIM
G. Gentile, D. Tiddi	Sinyal eşzamanlama	Sinyal eşzamanlama için genetik benzeri bir algoritma uygulaması	Genetik algoritma, makroskobik simülasyon, general link transmission model
F. Şimşir, E. Özkaynak, D. Ekmekçi	Trafik sinyalizasyon sistemi simülasyonu	Simülasyonla kavşaklardaki trafik sinyal sürelerinin ve araç yoğunluğunun incelenmesi.	Simülasyon, C# programlama dili

Tablo 1. *Trafik Sinyalizasyon Problemleri ile ilgili Literatür Özetleri*

Gecikme, kavşak sinyal (Şekil 1) zamanlamasının optimize edilmesinde ve kavşakta bekleyen araç yoğunluğunun belirlenmesinde en önemli faktörlerden biridir. Trafikteki yavaşlamanın belirlenmesine yönelik geleneksel yöntemler, yoğun kavşaklarda ihtiyaç duyulan çözümleri bulmak için yetersizdir. Bu nedenle trafik hacmi, trafik ışığı bekleme süresi ve sırada bekleyen ortalama araç sayısı, trafik sinyal kotrol sistemlerinin tasarımında önemli parametreler olarak ortaya çıkmaktadır .



Şekil 1. *Sağa sola dönüşlere izin veren sinyalize bir kavşak örneği*

Sinyal kontrol sistemleri kaynaklarda farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmalardan biri, sabit zamanlı sinyal kontrol sistemi ve trafik uyarmalı sinyal kontrol sistemidir.

Sabit Zamanlı Sinyal Kontrol Sistemi

Sabit zamanlı sinyal sisteminde, bir kavşağa farklı yönlerden yaklaşan araçlara ve yayalara, önceden belirlenmiş bir programa göre sırayla geçiş hakkı verilir. Kavşağa farklı yönlerden giren trafik için bu süreler ile yeşil ışık süresi arasındaki ilişki, ortalama trafik yükü değerine bağlıdır. Bu sistemin başarılı olabilmesi için dikkatli trafik sayımlarının yapılması gereklidir. Trafik akışı günün farklı saatlerinde farklı özelliklere sahiptir. Planlı sinyal sisteminin amacı, bu farklı özelliklere göre belirli zamanlarda otomatik olarak değişen

birkaç ayrı program uygulayarak trafik akışını mümkün olan en uyumlu şekilde düzenlemektir. Sabit sinyal sistemlerinin en büyük dezavantajı trafik hacimlerinin projede kullanılan ortalama değerlere uymaması ve bunun sonucunda kavşaklarda gereksiz bekleme sürelerinin oluşmasıdır. Bu dezavantajın etkisini azaltmak için, planlı sinyal sistemlerine sahip kavşakların sürekli olarak izlenmesi ve programların mevsim ve zaman içinde değişen trafik koşullarına göre değiştirilmesi gerekmektedir. Sabit zamanlı sinyalizasyonun avantajı uygulanmalarının oldukça ucuz olmasıdır.

Trafik Uyarmalı Sinyal Kontrol Sistemi

Trafik uyarmalı sinyal kontrol sisteminde araç önceliği ve süresi, dedektör tarafından tespit edilen trafik gereksinimlerine ve trafik yoğunluğuna göre ayarlanır. Bu sistem genel olarak yarı trafik uyarı sistemi ve tam trafik uyarı sistemi olmak üzere iki tipte uygulanmaktadır. Bu iki sistemin uygulanması önemli ölçüde daha fazla yatırım gerektirmektedir.

a) Yarı Trafik Uyarmalı Sistem: Bu tür sinyal sistemi, çeşitli kavşak yaklaşma kollarından uyarı alır. Bir yolun (genellikle bir ana yolun) trafik yönünde her zaman yeşil ışığı vardır ve tali bir yoldan veya bir caddeden geçme uyarısı almadıkça ana yolun ışığı değişmez.

b) Tam Trafik Uyarmalı Sistem: Bu tip sinyal sisteminde tüm kavşak yaklaşma kollarından sürekli olarak uyarı alınır ve uyarıyı alan yaklaşma kolunun trafik yoğunluğu değiştirilerek öncelikli trafik sırası ve süresi otomatik olarak belirlenir. Bu trafik uyarı sistemi, gerçek dünyaya yakın trafik yoğunluğu değerlerine dayalı olarak geçiş hakkı önceliği verdiğinden, genel gecikmeleri en aza indirmek için en ideal sistemdir. Trafik uyarmalı sinyal sistemlerinin mevcut uygulamaları arasında, OPAC, SCOOT; SCATS ve RHODES sayılabilir.

KAYNAKÇA

Akbaş, A. (2003). Mikroskobik Simulasyon ile Dinamik Sinyal Optimizasyonu. *İMO Teknik Dergi*, 2965-2967.

Bidanda, B., Sabuncuoğlu, İ., & Kara, B. (2015). *Industrial Engineering Non-Traditional Applications in International Settings.*

Borg, D. L., & Scerr, K. (2014). Constrained Dynamic Control of Traffic Junctions. *Procedia Computer Science*, 293-300.

Chiou, S. (2007). A Hybrid Optimization Algorithm for Area Traffic Control Problem. *Journal of the Operational Research Society*, 816-823.

Comert, G. (2013). Effect of Stop Line Detection in Queue Length Estimation at Traffic Signals form Probe Vehicles. *European Journal of Operational Research*, 67-76.

Dujardin, Y., Vanderpooten, D., & Boillot, F. (2015). A Multi-Objective Interactive System for Adaptive Traffic Control. *European Journal of Operational Research* , 601-610.

Dujardin, Y., Vanderpooten, D., & Boillot, F. (2015). A Multi-Objective Interactive System for Adaptive Traffic Control . *European Journal of Operational Research*, 601-610.

Dujardin, Y., Vanderppoten, D., Boillat, F., & Vinant, P. (2011). Multiobjective and Multimodal Adaptive Traffic Light Control on Single Junctions. *14th Internationaş IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.*

Ezzat, A., Khaled, A., El-Kilany, S., & Abdelmoneim, A. (2014). Development of a Stochastic Genetic Algorithm for Traffic Signal Timings Optimization. *Industrial and Systems Engineering Research Conference.*

Ezzat, A., Khaled, A., El-Kilany, S., & Abdelmoneim, A. (2014). Optimization Using Simulation of Traffic Light Signal Timings. *International Conference on Industrail Engineering and Operations Management.*

Gentile, G., & Tiddi, D. (2009). *Synchronization of Traffic Signals Through a Heuristic-Modified Genetic Algorithm with GLTM.*

Grether, D., Neumann, A., & Nagel, K. (2012). Simulation of Urban Traffic Control: A Queue Model Approach. *Procedia Computer Science*, 808-814.

He, Q., Head, K., & Ding, J. (2010). *Heuristic Algorithm for Priority Traffic Signal Control.*

He, Q., Head, K., & Ding, J. (2014). Multi-Modal Traffic Signal Control with Priority, Signal Actuation and Coordination . *Transportation Research Part C*, 65-82.

He, Q., Lin, W. H., Liu, H., & Head, K. (2010). *Heuristic Algorithms to Solve 0-1 Mixed Integer LP Formulations for Traffic Signal Control Problems.*

Mohan, A., & Lourds, J. (2013). An Intelligent Algorithm for Traffic Signal Scheduling. *International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences.*

Pour, N. S., Asadi, H., & Kheradmand, M. P. (2013). Fuzzy Multiobjective Traffic Light Signal Optimization. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics*.

Recker, W., Zheng, X., & Chu, L. (2008). Optimization of Control Parameters for Adaptive Traffic Actuated Signal Control. *ITS World Congress*. New York.

Salimifard, K., & Ansari, M. (2013). Modeling and Simulation of Urban Traffic Signals. *International Journal of Modeling and Optimization*.

Singh, L., Tripathi, S., & Arora, H. (2009). Time Optimization for Traffic Signal Control Using Genetic Algorithm. *International Journal of Recent Trends in Engineering*.

Şimşir, F., Özkaynak, E., & Ekmekçi, D. (2013). *Kavşaklarda Trafik Sinyalizasyon Sisteminin Modellemesi ve Benzetimi.*

Taha, M. A., & İbrahim, L. (2012). Traffic Simulation System Based on Fuzzy Logic. *Procedia Computer Science*, 356-360.

Vilarinho, C., & Tavares, J. (2014). Real-Time Traffic Signal Settings at an Isolated Signal Control Intersection. *Transportation Research Procedia 3*, 1021-1030.

Vilarinho, C., & Tavares, J. (2014). Real-Time Traffic Signal Settings at an Isolated Signal Control Intersection. *Transportation Research Procedia 3*.

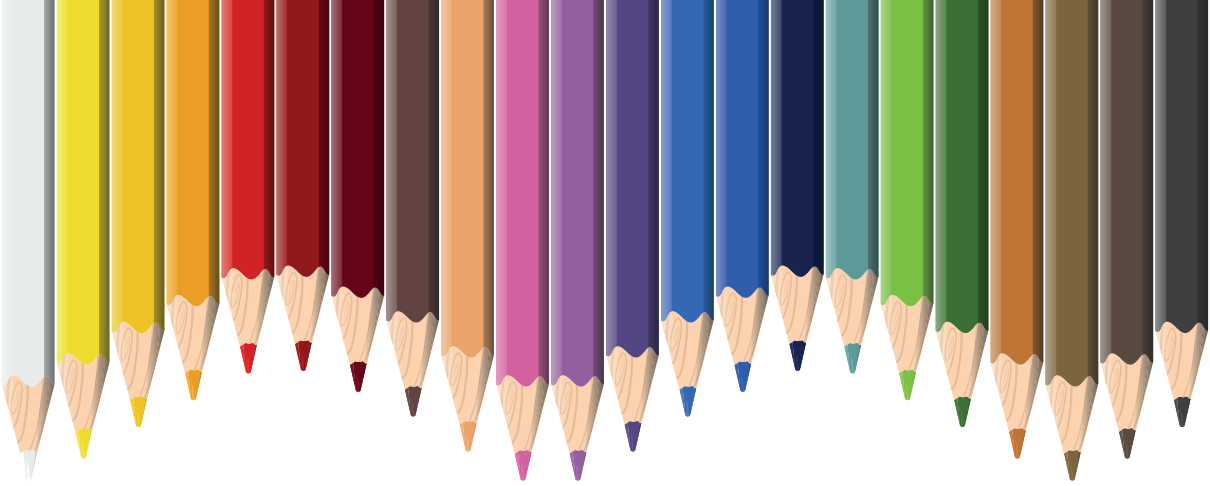
Wang, F., Ye, C., Zhang, Y., & Li, Y. (2014). Simulation Analysis and Improvement of the Vehicle Queuing System on Intersections Based on MATLAB. *The Open Cybernetics & Systemics Journal*, 217-223.

Wang, F., Ye, C., Zhang, Y., & Li, Y. (2014). Simulation Analysis and Improvement of the Vehicle Queuing System on Intersections Based on MATLAB. *The Open Cybernetics & Systemics Journal* , 217-223.

Wen, W. (2008). A Dynamic and Automatic Traffic Light Control Expert System for Solving the Road Congestion Problem. *Expert Systems with Applications*, 2370-2381.

Wen, W. (2008). A Dynamic and Automatic Traffic Light Control Expert System for Solving the Road Congestion Problem. *Expert Systems with Applications*, 2370-2381.

Zhou, Z., & Cai, M. (2014). Intersection Signal Control Multi-Objective Optimization Based on Genetic Algorithm. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 153-158.



Bölüm 22

EMÜLSİYON SİSTEMLER VE STABİLİTELERİ

İrem ALAÇIK DEVELİOĞLU[1]
Kemal Kaan TEKİNŞEN[2]

1 KTO Karatay Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-4698-3191
2 Prof. Dr., Selçuk Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-3287-3925

1. GİRİŞ

Emülsiyon bilimi multidisipliner bir alandır ve bünyesinde kimya, fizik, mühendislik gibi alanları barındırır. Emülsiyon sistemleri, nihai gıda, farmasötik ve kozmetik ürünlere stabilite, doku, görünüm ve lezzet geliştirme gibi daha iyi özelliklerle katkıda bulunur. Sıklıkla gıda endüstrisinde kullanılan emülsiyon bilimi ile gıdaların kalitesini artırmak, üretim tekniklerini geliştirmek gibi temel faydalar sağlanmaktadır (McClements, 2007; Serdaroğlu vd., 2015).

Emülsiyonların genel avantajları değerlendirildiğinde, literatürde ve sektörde karşımıza çıkan olası faydaları aşağıda belirtilmiştir:

– Çözeltilere oranla etkin maddelerin kimyasal stabilitesini sağlarlar.

– İçeriklerinde yağ bulundurduklarından dolayı özellikle gıda sektöründeki ürünlerin raf ömrü ve kalite standartlarının belirlenmesinde etkilidirler.

– Stabilitelerinin sağlanması ile kalite devamlılığının kontrolünde etkilidirler.

– Tadı kötü olan etkin maddelerin yaratacağı istenmeyen tat ve kokuların maskelenebilmesinde kullanılabilirler.

– Enkapsülasyon tekniğinde temel oluşturur.

– İlaç sektöründe etkin maddelerin emilimlerini artırabilirler.

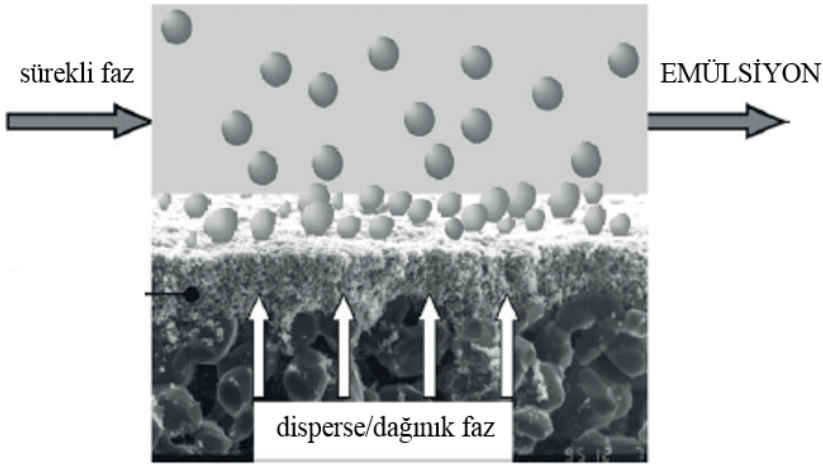
– Peptidler (insülin, kalsitonin…) ve heparin gibi makromolekül yapıdaki maddelerin gastrointestinal kanalda emilimlerini artırabilirler.

– Farklı sektörlerde üretim öncesi model sistem çalışmalarında kullanılabilirler.

2. EMÜLSİYONLAR

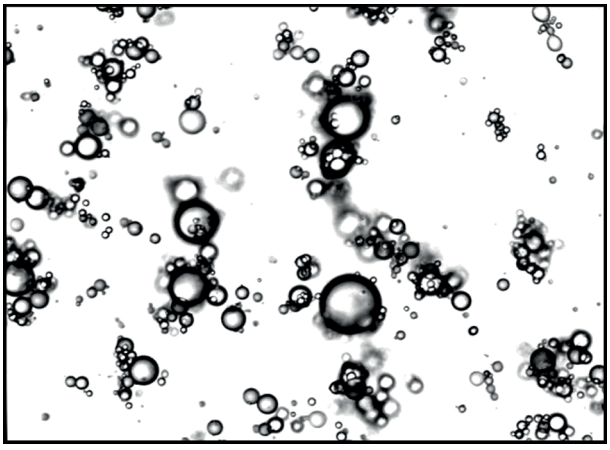
2.1. Emülsiyon Kavramı ve Emülsiyonların İçerik Olarak Değerlendirilmesi

Genel tanımıyla emülsiyon sistemler, birbirleriyle karışmayan iki farklı sıvıdan birinin diğerinin içerisinde küresel damlacıklar halinde dağılmasıyla oluşmuş, homojen görünüşe sahip heterojen sistemlerdir (McClements, 2007). Damlacık formundaki kısım dağınık/ iç/ süreksiz/ dispers faz olarak adlandırılırken; sıvı kısım mobil/ harici/ dış/ sürekli faz olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1'de dispers fazdan sürekli faza geçiş yapan damlacıkların emülsiyon oluşturma süreçleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1. *Sürekli faz ve dispers faz arasında damlacık oluşumuna bağlı emülsiyon eldesi (Lambrich & Schubert, 2005)*

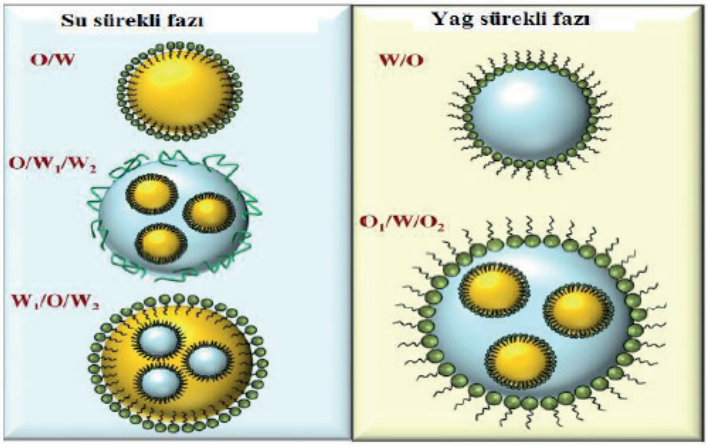
Gıda endüstrisinde en sık kullanılan, karışmayan bu fazlar yağ ve sudur. Bu nedenle emülsiyonlar, hangi fazda hangi fazın dağıldığına bağlı olarak Şekil 2.2'de fotomikrografik görseli verilen su içinde yağ emülsiyonu (oil in water, O/W) veya yağ içinde su emülsiyonu (water in oil, W/O) olarak adlandırılır (Guzey & McClements, 2006). Mayonez, süt, kremada olduğu gibi yağ damlacıklarının sürekli faz olan su içerisinde dağıldığı emülsiyonlara su içinde yağ (O/W) emülsiyonları denilirken; margarin, tereyağı ve yağ bazlı sürülebilir ürünlerde olduğu gibi sürekli faz olan yağ içerisinde su damlacıklarının dağıldığı emülsiyonlara yağ içinde su (W/O) emülsiyonları denilmektedir (McClements, 1999; Robins & Wilde, 2003).



Şekil 2.2. *Sürekli faz olan su içerisinde dağılmış yağ damlacıklarından oluşan bir su içinde yağ (O/W) emülsiyonunun fotomikrografisi (McClements, 2007)*

Ayrıca, emülsiyon emülsiyonları olarak kabul edilen çoklu emülsiyonlar da bulunmaktadır. Emülsiyon sistemlerindeki yağ içeriğini düşürme potansiyeline sahip olduğu için kapsülleme çalışan gıda bilimcileri başta olmak üzere pek çok alanda çalışan bilim insanından oldukça fazla ilgi gören bu çoklu emülsiyonlar genellikle yağda su içinde yağ, O/W/O ya da suda yağ içinde su, W/O/W formlarında bulunmaktadır (Muschiolik & Dickinson, 2017). Çoklu kompleks emülsiyonların kullanım alanlarına göre W/O/O, O/W/O/W, O/W/O/O gibi farklı formları da oluşturulabilmektedir (Khan vd., 2014).

Suda yağ içinde su genellikle $W_1/O/W_2$ olarak gösterilir; burada W_1 iç dağılmış fazdır, O iki su fazını ayıran dış dağılmış faz olan yağdır ve W_2 sürekli fazdır. $W_1/O/W_2$'nin şematik bir gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir. $W_1/O/W_2$ emülsiyonlarının hem hidrofilik (W_1 fazı içinde) hem de lipofilik (O fazı içinde) bileşikleri aynı anda taşıması, geleneksel emülsiyonlara kıyasla bu aktif maddelerin yeme ve sindirim sırasında kontrollü salınımı gibi üstünlükler sağlamaktadır (Jiménez-Colmenero, 2013).



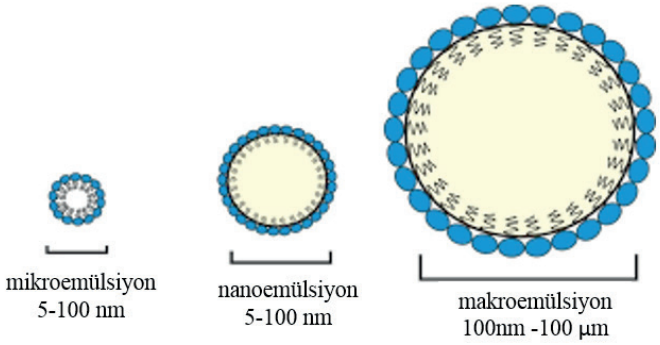
Şekil 2.1 Gıda teknolojisindeki emülsiyonların yapısı (Chung ve McClements 2014).

Şekil 2.3. *Çoklu emülsiyonların şematik yapısı (Chung & McClement, 2014).*

W/O/W emülsiyonları, farmasötik endüstrisinde kanser önleyici maddeler, hormonlar, steroidler vb. için taşıyıcı olarak; kozmetik endüstrisinde kapsüllenmiş bileşiklere sahip kremlerin kolay uygulanmasını sağlamak amaçlı, enkapsülasyon tekniği ile antioksidan içeriği ya da aroma gibi aktif ve hassas maddelerin çevresel faktörlerden korunmasını sağlamak, gıdaların daha düşük yağ içeriğiyle muhafazasını sağlamak gibi farklı endüstrilerdeki birçok alanda sağladığı kolaylıklar sebebiyle de sıklıkla kullanılmaktadır (Jiménez-Colmenero, 2013; Muschiolik & Dickinson, 2017; Serdaroğlu vd., 2015).

2.2. **Emülsiyonların Boyutsal Sınıflandırılması**

Temel olarak içerik değerlendirmesine göre emülsiyonlar önceden de belirtildiği gibi basit ve çoklu emülsiyonlar olmak üzere iki kategoride incelenmektedir. Damlacık/parçacık boyutuna göre değerlendirildiğinde ise emülsiyonlar Şekil 2.4'te gösterildiği gibi makroemülsiyonlar, mikroemülsiyonlar ve nanoemülsiyonlar olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır (Khan vd., 2014).



Şekil 2.4. *Parçacık boyutuna göre emülsiyonların sınıflandırılması (Attri vd., 2021).*

Makro, mikro ve nanaoemülsiyonların temel özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. *Su, yağ ve emülgatör içeren emülsiyon sistemlerin bazı temel özellikleri*

Emülsiyon türü	Parçacık çapı	Termodinamik stabilite	Optik özellikleri*
Makroemülsiyon	100nm-100 µm	Stabil değil	Opak/bulanık
Nanoemülsiyon	20-200nm	Stabil değil	Berrak/bulanık
Mikroemülsiyon	5-100nm	Stabil	Berrak

*Optik özellikler tipik yağ-su karışımının refraktif indeks değeri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

a. Makroemülsiyonlar:

Damlacık boyutu 100 nm ile 100 µm arasında değişen emülsiyon sistemler makroemülsiyonlar olarak adlandırılır. Bu parçacık boyutları ışığın dağılmasına izin verdiğinden dolayı emülsiyonlara beyaz renk vermektedir (Khan vd., 2014; Serdaroğlu vd., 2015). Makroemülsiyonlar süt, içecekler, mayonez ve dip soslar gibi sıklıkla kullanılan emülsiyon özellikli ürünleri oluştururlar. Yerçekimine bağlı ayrılma gibi çevresel stres faktörleri nedeniyle fiziksel olarak kararsızdırlar (McClements, 2007; Dickinson, 2010).

b. Mikroemülsiyonlar:

Damlacık boyutu 5 ile 100 nm arasında değişen emülsiyon sistemlerdir. Mikroemülsiyonlar genellikle sistemin kendiliğinden oluşumunu indükleyen bir yüzey aktif madde, bir de yardımcı yüzey aktif maddeyi birlikte barındırırlar. Mikroemülsiyonlar genellikle düşük viskoziteli, termodinamik olarak stabil ve transparan/şeffaf görünümlüdürler (Khan vd., 2014; Serdaroğlu vd., 2015).

Araştırmacılar mikroemülsiyonları ve nanoemülsiyonları tipik olarak yağ, su ve yüzey aktif madde içerdikleri ve benzer parçacık boyutlarına sahip oldukları için benzer olarak değerlendirirler. Fakat nanoemülsiyonlar mekanik kuvvetler sonucunda oluşturulurken, mikroemülsiyonlar kendiliğinden oluşabilmektedir (Fanun, 2009; Serdaroğlu vd., 2015). Başka bir deyişle yağ, su ve yüzey aktif madde içeren karışımlar kendiliğinden mikroemülsiyon oluşturabilmektedir. Mikroemülsiyon ve mikro boyutlu emülsiyonların arasındaki farkın temeli emülsiyonun içeriği değil termodinamik yapı özelliğidir. Mikroemülsiyonlarda yağ damlacıkları su içinde ya da su damlacıkları yağ içinde dispers olabilmektedir, Stabilitelerinde ve oluşumlarında esas olan çok düşük yüzeyler arası gerilime sahip olmalarıdır.

c. Nanoemülsiyonlar:

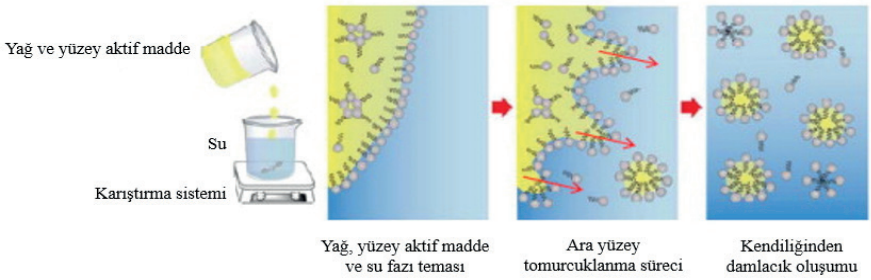
Nanoemülsiyonlar ise ortalama 20-200 nm ile nanometrik ölçekte damlacık çapı boyutuna sahip emülsiyonlardır (Solans vd., 2005). Mikroemülsiyonlarla karşılaştırıldıklarında termodinamik olarak stabil değillerdir.

Nanoemülsiyonlar, şeffaf ve yarı saydam bir görünüme sahip olmaları, daha küçük parçacık boyutlarına sahip olmaları, çökelme ve kremleşmeye karşı kararlı olmaları ve biyoyararlanımı artırma eğiliminde olmaları nedeniyle geleneksel emülsiyonlardan üstündür. Nanoemülsiyonlar, yağ asitleri, polifenoller, antimikrobiyaller, doğal renklendiriciler, vitaminler, bazı mikro besinler ve aromalar gibi fonksiyonel ajanların taşınmasında yenilikçi bir yaklaşım olarak gıda endüstrisinde her geçen gün daha önemli ve kullanılabilir bir hale gelmektedir (McClements & Rao, 2011). Özellikle W/O nanoemülsiyonlar enkapsülasyonda kullanılabilmeleri itibariyle gıda sektöründe gittikçe önem kazanmaktadır (Serdaroğlu vd., 2015).

2.3.**Emülsifikasyon**

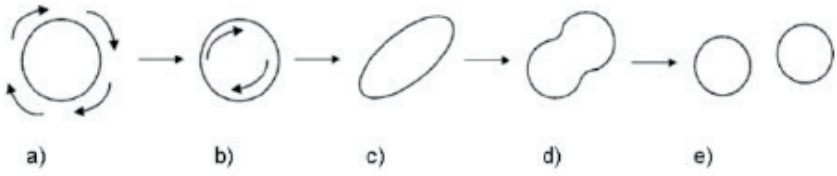
Emülsiyon oluşma süresine emülsifikasyon denilmektedir (Akbari & Nour, 2018). Bir emülsiyon oluşumu için Şekil 2.5'te gösterilen üç koşul gereklidir:

- Emülsiyonun fazları arasında karışmama durumu,
- Bir sıvıyı diğerinde dağıtmak için çalkalama, karıştırma gibi bir proses,
- Yüzey aktif maddelerin varlığı.



Şekil 2.5. *Emülsifikasyon sırasında kendiliğinden damlacık oluşma süreci (Saberi vd., 2013).*

Emülsifikasyon, dinamik ve kendiliğinden olmayan bir süreçtir ve birbirine karışmayan sıvılardan dispers olanı, sürekli fazda küçük damlacıklar şeklinde dağıtmak için genellikle önemli miktarda mekanik enerji gerekmektedir (Solans vd., 2016). Emülsifikasyonda kullanılan temel yöntemler basit çalkalamadan, yüksek basınçlı homojenizatörlere kadar farklı kategorilerde değerlendirilebilinmektedir. Başarılı bir emülsifikasyon süreci için genellikle ilk adımda iki fazın basit karışması sağlanırken, ikinci adımda damlacık boyutlarını küçültmek adına özel yüksek enerjili sistemler kullanılmaktadır (Güngör vd., 2013). Yüksek enerjili sistemlere örnek olarak genellikle homojenizatör adı verilen mekanik cihazlar kullanılmaktadır. Gıda endüstrisindeki emülsiyonlar için en yaygın kullanılan mekanik cihazlar yüksek hızlı karıştırıcılar, yüksek parçalayıcılı karıştırıcılar, kolloid değirmenler, mikroakışkanlaştırıcılar, yüksek basınçlı valf homojenleştiriciler ve sonikatörlerdir (Develioğlu, 2019). Bir damlacığı daha küçük boyutlara bölebilmek için damlanın şeklinin değiştirilmesi gerekir ve bu deformasyon emülsiyonun karıştırılması, kesilmesi ya da parçalanması sırasında meydana gelir ve sürecin ilk aşaması tomurcuklanma gibi değerlendirilebilir (Şekil 2.5). Emülsifikasyon sırasında gözlenen damlacık deformasyonu ve parçalanma süreci Şekil 2.6'da şematize edilerek gösterilmiştir.

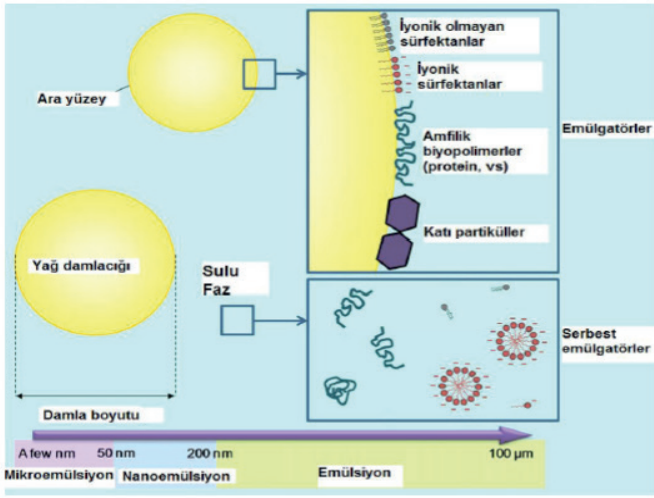


Şekil 2.6. *Emülsifikasyon prosesinde damlacık deformasyonu (Akbari & Nour, 2018)*

Su içinde yağ emülsiyonlarının stabilitesi ve reolojisi damlacıklar arasındaki etkileşime bağlıdır. Sınırlı bir zaman dilimi boyunca kinetik olarak kararlı yapıda emülsiyonlar oluşturmak için çevresel streslere karşı dirençli olmayı sağlayan karıştırma, çalkalama gibi yöntemler ya da homojenleştiriciler gibi yüksek performanslı cihazlar bazen yeterli kalmazlar. Bu nedenle, emülsiye edici ajanlar olarak bilinen emülgatörler, koyulaştırıcı maddeler, stabilize edici ajanlar, jelleştiriciler gibi maddeler kullanmak gerekebilmektedir (Mcclements & Gumus, 2016).

Emülsiyonların kararlılığını dispers faz kadar sürekli fazın özellikleri de etkilemektedir. Sürekli fazın içerisinde emülsiyonların fizikokimyasal özelliklerini etkileyen farklı bileşenler bulunmaktadır. Tuz, nişasta, gamlar, aroma bileşenleri ve asitler bu bileşenlere örnek olarak gösterilebilir. Örneğin stabilizatör maddeler sürekli fazın viskozitesini arttırma etkisiyle emülsiyon kararlığında etkili olurken; tuz ve tuz benzeri maddeler ise sürekli fazın yük yoğunluğunda belirgin bir değişime neden olurlar. Emülsiyonların kararlılığını sürekli fazda bulunan bileşenlerin çeşitleri ile konsantrasyon oranları belirgin şekilde etkilemektedir. Bunlara ek olarak ortamın yük dengesi, polaritesi, var olan bileşenlerin etkileşim, şekil ve yoğunluk gibi özellikleri de emülsiyon kararlılığı üzerinde etkili olmaktadır. Bu yüzden emülsiyon özellikte kaliteli bir ürün üretebilmek için belirtilen bileşenlerin uygun seçilmesi ve bu bileşenlerin oranlarının optimize edilmesi gerekmektedir.

Sürekli ve dispers faz arasında bulunan ara yüzey bölgesi, özellikle emülsiyonlar bağlamında kritik bir role sahiptir (Şekil 2.7). Bu ara yüzey bölgesi, su, yağ molekülleri, emülgatörler, hidrokolloidler ve tuzlar gibi diğer bileşenleri içermektedir. Ara yüzey bölgesi, emülsiyonların toplam hacmiyle karşılaştırıldığında oldukça küçük bir alan kaplamaktadır. Buna rağmen bu bölgenin özellikleri, emülsiyonların stabilitelerini, reolojik, mikroyapısal ve duyusal özelliklerini belirleyici etkiler yaratmaktadır. Bu nedenle, emülsiyonların oluşturulması ve özelliklerinin geliştirilmesi sürecinde, ara yüzey özelliklerinin oldukça büyük bir önem taşıdığı dikkate alınmalıdır (Berton-Carabin vd., 2014). Gıda işlemleri ve formülasyonlarında kullanılan temel bileşenler, ara yüzeyin özelliklerini direkt olarak etkilediği için, bileşen seçimi ve uygulanacak işlemin parametrelerinin optimize edilmesi, ara yüzey özelliklerinin en etkili şekilde geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 2.2. Yağ su emülsiyonlarının genel özellikleri ve bileşenlerinin şematik gösterimi (Berton-Carabin ve ark. 2014)

Şekil 2.7. *Yağ ve su emülsiyonlarının genel özellikleri ve emülsiyon bileşenlerinin şematize edilerek gösterimi (Berton-Carabin vd., 2014).*

2.4.**Emülsiyonların Kararlılığı/Stabilitesi**

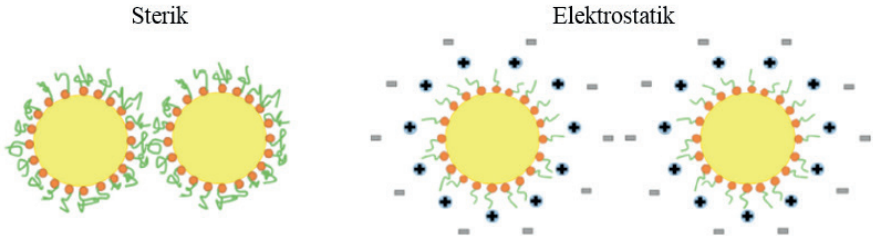
Bazı emülsiyonlar, küçük damlacık boyutları ve damlacıkları çevreleyen ara yüzey filminin varlığı nedeniyle stabil olabilse de genellikle emülsiyonlar birbirine karışmayan yağ ve su fazları arasındaki uygun olmayan temastan dolayı kinetik kararsızlığa eğilimli sistemlerdir. Fiziksel gözlemi için yeterli zaman verilirse sonunda ayrılırlar. Ancak emülsiyonların gözlenilen stabilitelerinin uzun süreli devamlılığı için, emülsiyon oluşturulması sırasında uygulanan mekanik kuvvetin gücü, süresi ve kullanılan yüzey aktif maddenin doğru seçilmesi önemlidir (Akbari & Nour, 2018). Makroemülsiyonlar stabilite anlamında kararsızlık eğilimi en yüksek emülsiyon grubunu oluştururlar.

Emülsiyon stabilitesi kavramı, emülsiyon özelliklerinin zaman içindeki değişimlere karşı gösterdiği direnci, dayanıklılığı temsil eder. Yüksek stabiliteye sahip emülsiyonların karakteristik özellikleri, dış ortam koşullarına bağlı olarak oldukça yavaş değişim gösterme hızına sahiptirler. Bu sebeple stabil emülsiyonlar kararlı olarak kabul edilebilmektedir. Emülsiyon sistemlerin stabiliteleri farklı fiziksel ve kimyasal süreçlerden dolayı bozulabilmektedir. Fiziksel instabilite, moleküler yapıların düzenindeki veya mekanik dağılımındaki değişikliklerden kaynaklanırken; kimyasal instabilite ise, moleküler yapıdaki kimyasal değişikliklerden kaynaklanır (Güngör vd., 2013).

pH, asitlik, viskozite, yerçekimi, yağ veya su konsantrasyonu gibi çeşitli fiziksel koşullar emülsiyonların kararsızlık mekanizmalarında temel rollere

sahip olabilirler. Damla konsantrasyonu, damla yükü, damlacık boyutu genellikle bu faktörlerden etkilenir ve emülsiyonların kararsız hale gelmesine neden olur. Kararsızlığa neden olan baskın faktörü anlamak genellikle zordur. Farklı koşulları hem ayrı ayrı hem de birbirleriyle olan etkileşimlerini birlikte değerlendirmek gerekmektedir.

Literatür incelemeleri sonucunda, emülsiyonların stabilitesinin bozulmasının açıklanmasında damlacıkların yükleri baz alınırsa, damlacıklar arasında gelişen sterik ve elektrostatik etkileşimlerin (Şekil 2.8) temel olarak bahsedilen iki kavram olduğu görülmektedir:



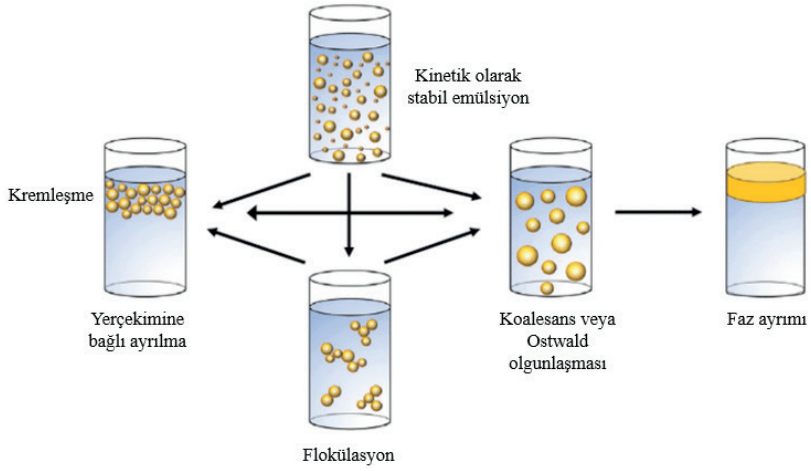
Şekil 2.8. *Emülsiyonların stabilitesin etkileyen damlacıklar arasındaki etkileşim (Shao vd., 2020)*

- Sterik etkileşimler: Sterik etkileşimler, bir emülsiyonun ara yüzey özellikleri ile doğrudan ilgili olan ve emülsiyon stabilitesini etkileyen baskın faktördür. Emülgatör, emülsiyon oluşumu sırasında kararlı bir emülsiyon oluşturmak için damlacıkların yağ-su ara yüzünde adsorbe eder. Farklı emülgatör türleri, damlacıklar arasında farklı güçlerde etki yaratan sterik etkileşimlere bağlı, farklı ara yüzey kalınlıkları ile sonuçlanır.

Elektrostatik etkileşimler: Damlacıkların ara yüzey kuvveti yetersiz olduğunda, elektrostatik etkileşimler, elektrostatik itme süreci emülsiyon yapısının kararlılığında önemli bir rol oynayacaktır. Elektrostatik itmenin yoğunluğu damlacıkların yük yoğunluğu ve iyonik gücü ile ilgilidir. Elektrostatik etkileşim bir kez zayıfladığında emülsiyon kararsız hale gelebilir (Shao vd., 2020).

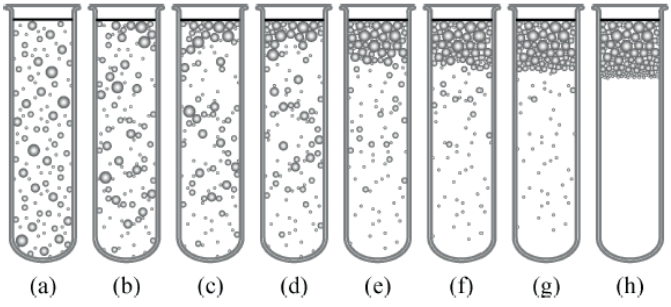
2.5.**Emülsiyonlarda Fiziksel Kararsızlık/İnstabilite**

Bir emülsiyon çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçler nedeniyle instabil hale gelebilir. Fiziksel instabilite sorunları moleküllerin uzaysal dağılımındaki ve/veya yapısal organizasyonundaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.9'da gösterildiği şekilde yerçekimine bağlı ayrılma, flokülasyon, kremleşme, sedimentasyon, koalesans, Oswalt olgunlaşması gibi süreçlerin takibinde faz ayrımı gerçekleşebilmektedir (Liu vd., 2019; Tcholakova vd., 2006). Fiziksel instabilite ve doğal olarak faz ayrımına sebep olan bu süreçleri incelediğimizde:



Şekil 2.9. *Emülsiyonların genel instabilite mekanizmasının şematik formu (Liu vd., 2019)*

-Kremleşme süreci, damlacıkların yoğunluğunun sürekli fazdan daha düşük olması sebebiyle yerçekimine karşı, yukarıya doğru hareket etmesi ile oluşan süreci tanımlamaktadır (Şekil 2.10). Kremleşme kavramı pratikte farklı büyüklüklerdeki damlacıkların hareketi olarak da kabul edilmektedir. Kremleşme süreci esasen geri dönüşümlü bir işlemdir. Flokülasyon ve/veya koalesans sürecine ulaşana kadar damlacıklar kreama tabakasının altında oluşan ince bir film yapısı ile krema tabakasından ayrı tutulur. Bu süreçte damlacıklar hafifçe çalkalanarak sürekli faza yeniden dağıtılabilir (Damodaran, 2005).

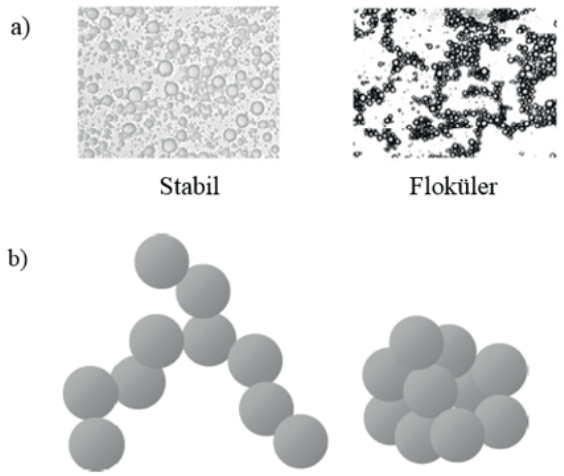


Şekil 2.10. *O/W emülsiyon örneğinde zamana bağlı kremleşme süreci (McClements, 2007)*

-Sürekli fazın yoğunluğu damlacıkların yoğunluğundan daha küçük olduğunda ise damlacıklar aşağı doğru hareket eder ve buna sedimantasyon

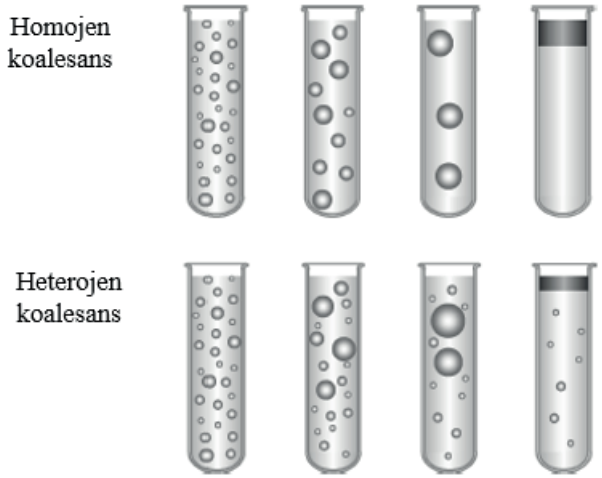
denir. Kremleşme ve sedimentasyon süreçleri yerçekimi kaynaklı ayrım süreçleridir (Tcholakova vd., 2006; Develioğlu, 2019).

-Flokülasyon, iki veya ikiden fazla damlacığın bir agrega oluşturmak üzere bir araya geldiği başka bir süreçtir ve bu süreçte (Şekil 2.11) damlacıklar hala bireysel bütünlüklerini korurlar (Liu vd., 2019).



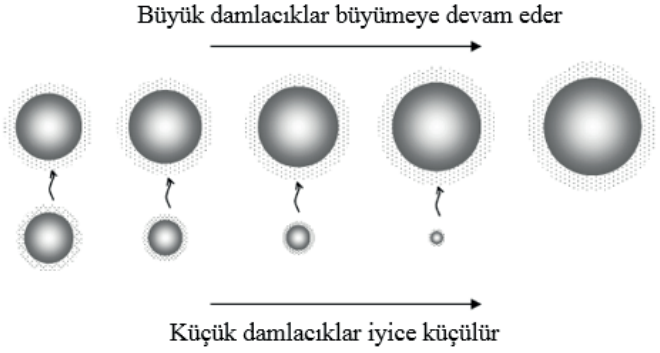
Şekil 2.11. *a) Stabile olmuş emülsiyon ve floküle olmuş emülsiyon arasındaki fark (Güngör vd., 2013), b) Floküle olan alandaki floküle damlacıkların sayılarına bağlı konumsal yerleşimleri (McClements, 2007)*

-Koalesans ya da birleşme sürecinde ise iki veya daha fazla damlacık birbirlerine yapışarak daha büyük bir damla oluştururlar (Şekil 2.12). Damlacıkların koalesansı bu süreç sonunda yağ ve sıvı fazın birbirinden tamamen ayrılmasına sebep olur. Kremleşmiş ya da floküle olmuş emülsiyonlarda görülür ve geri dönüşümsüz bir süreçtir (Damodaran, 2005).



Şekil 2.12. *Emülsiyonlarda koalesans sürecinin şematik gösterimi (McClements, 2007)*

-Oswalt olgunlaşması olarak adlandırılan diğer süreç ise küçük damlacıkların küçülmesi ile büyük damlacıkların oluşumu şeklinde tanımlanmaktadır ve damlacıklar arasındaki dispers fazın moleküler difüzyonuna bağlı olarak gerçekleşmektedir ve Şekil 2.13'te şematize edilmiştir (Güngör vd., 2013).



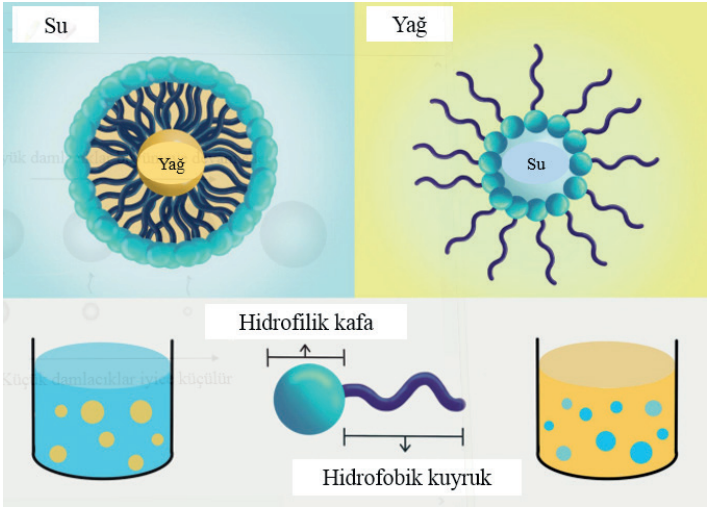
Şekil 2.13. *Ostwald olgunlaşması sürecinin şematik gösterimi (McClements, 2007)*

Bu süreçlerin sonunda emülsiyonlarda zamana bağlı faz ayrımı gözlenmektedir. Faz ayrımı bir emülsiyon hazırlanırken iki fazın birbirine karıştırılması, ısıtılması ya da soğutulması sırasında görülebildiği gibi ortama bir elektrolit eklenmesi, emülsiyon pH'ında olan değişim ya da emülsiyonun içeriğini oluşturan ürünlerin oranlarının değiştirilmesi ile de gerçekleşebilmektedir. Diğer tarafta oksidasyon, hidroliz gibi moleküllerin kimyasal yapılarında değişiklik yaratacak süreçlerin kimyasal kararsızlıkla doğrudan ilişkili olduğu da unutulmamalıdır (Liu vd., 2019; Develioğlu, 2019).

3. EMÜLSİFİYE EDİCİ AJANLAR

Emülsiyonların yağ ve su molekülleri arasında var olan yoğunluk farkı ve her iki molekül arasındaki yüzey gerilimi nedeniyle termodinamik olarak stabil olmayan yapılar olduğuna önceki bölümlerde değinilmişti. Emülsiyon sistemlerden su içerisinde yağ (O/W) emülsiyonları gıda, kozmetik gibi sektörlerde sıklıkla kullanıldıklarından dolayı; sektörde kullanılan ürünlerde emülsiyonların stabil formda olmaları yani yağ moleküllerinin su içerisinde kararlı dispersiyonlar oluşturmaları oldukça önemlidir. Termodinamik açıdan kararlı emülsiyonların oluşturulması için sürekli fazın hareketliğini ve yüzey gerilimini azaltan emülgatörler ve/veya stabilizatörler gibi stabilize edici ajanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Emülgatörler yağ ve su molekülleri arasındaki yüzey gerilimini azaltma etkisiyle yağ damlacıklarının agregasyonunun önlemede ve yağ damlacıklarının mobil faz içerisinde daha kararlı olarak dağılmasında önemli role sahiptirler (Karasu, 2015). Bu süreç kullanılan emülgatörün çeşidine ve fonksiyonuna göre değişiklik göstermektedir (Dickinson, 2009). Fosfolipitler, bazı proteinler ve polisakkaritler emülgatörler başlığında değerlendirilmektedir.

Emülgatörler Şekil 3.1'de belirtildiği gibi su seven, polar olarak bilinen hidrofilik bir kafa ve yağ seven, polar olmayan grup olarak bilinen hidrofobik bir kuyruk içeren amfifilik moleküllerdir ve kendilerini yağ ve su molekülleri arasında hidrofilik kafa kısımlarını su fazı ile, hidrofobik kuyruk kısımlarını yağ fazı ile etkileşime girecek şekilde konumlandırarak emülsiyon stabilizasyonu sağlarlar (Develioğlu, 2019).



Şekil 3.1. *W/O ya da O/W formundaki emülsiyonlar ve stabiliteleri için kullanılan emülsifiye ya da stabilize edici ajanlardan olan emülgatörlerin şematize yapıları (Ashaolu, 2021)*

Yani emülgatörlerin kararlı bir emülsiyon oluşturma kapasiteleri hidrofilik lipofilik denge değerleri (HLB), kullanılan konsantrasyonları ve sistemde yayılım gösterebilme kapasitelerine bağlı olmakla birlikte başarılı bir emülsiyon eldesi emülgatörlerin bazı fizikokimyasal özellikleriyle de açıklanabilmektedir. Bu özellikler (Ozturk & McClements, 2016; Karasu, 2015):

- **Yüzey aktif özellik**: Yapılarında polar olan ve polar olmayan gruplar barındıran emülgatörler bu özellikleri sayesinde yağ ve su arasındaki yüzeyde kolaylıkla tutunabilirler.

- **Tutunma kinetiği**: Emülgatörler, homojenizasyon sürecinde damlacık yüzeylerine hızla bağlanarak yüzey gerilimini azaltır ve bu sayede damlacıkların bir araya gelmesini yani agregasyonu engeller.

- **Ara yüzey gerilimini düşürme özelliği**: Emülgatörler, yağ ve su ara yüzeyine tutunarak bu bölgedeki gerilimi hızla düşürürler. Ara yüzey gerilimde gerçekleşen bu düşüş, homojenizatörlerin damlacıklar üzerindeki etkisini güçlendirir.

- **Stabilite sağlama**: Emülgatörler, damlacıkların etrafında elektrostatik ve sterik itme kuvvetleri gibi itici kuvvetler uygulayarak damlacıkların birleşmesini engellerler. Bu itici kuvvetler, emülgatörlerin stabilizatör ve/veya diğer bileşenlerle etkileşime girerek damlacık etrafındaki zeta ve yüzey gibi temel yük potansiyellerini artırmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, damlacıkların birbirine yaklaşmasını elektrostatik etkiyle önler.

- **Yüzey kaplama**: Emülgatör miktarının tüm damlacıkların yüzeylerini kaplayacak miktarda olması önemlidir. Damlacıkların sayısı ve yüzey yükü artıkça ihtiyaç duyulan emülgatör oranı artacaktır. Bu nedenle her iki yüzeyin de yeterince emülgatörle doyurulması önemlidir.

Emülsiyonların oluşumunda kullanılan kıvam arttırıcı maddeler ve stabilize edici maddeler/stabilizatörler gibi bileşenler emülsiyonlaştırıcı ajanlardan farklıdır, fakat terimsel olarak sıklıkla karıştırılmaktadır. Kıvam arttırıcı maddeler tipik olarak emülsiyonun sürekli fazında viskoziteyi arttırıp damlacıkların hareketlerini sınırlayarak emülsiyon stabilitesini geliştirir ve son ürünün karakteristik özelliklerinş belirlerler. Stabilize edici ajanlar/stabilizatörler ise hem emülsifiye edici ajanlar hem de kıvam artırıcı ajanlar tarafından sağlanan stabiliteyi arttırmak için kullanılır (McClements, 1999).

3.1. **Gıda Endüstrisinde Stabilizasyon için Sıklıkla Kullanılan Emülsifiye Edici Ajanlar**

Bir emülsiyon hazırlanırken ya da bir emülsiyon formülasyonu geliştirilirken uygun ajanı seçebilmek için bazı noktalara dikkat edilmesi gerekmektedir:

- Yağ-su ara yüzeyinde damlacıklar arası elektrostatik ve sterik ilişki-

lerle yüzey gerilimini düşürecek özellikte bir yüzey aktif madde olmalıdır.

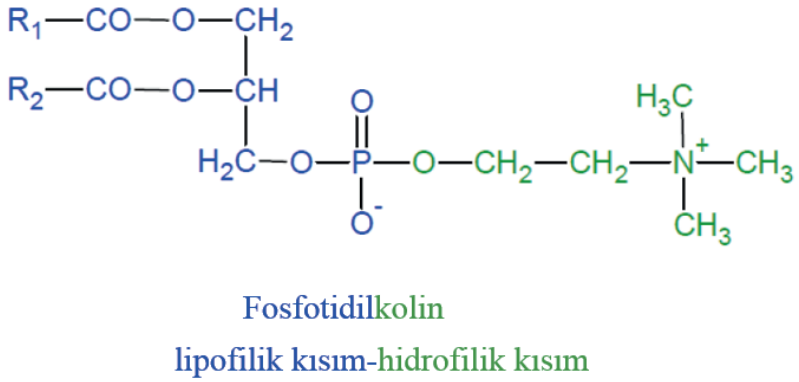
- Yağ damlacıklarında adsorbe olup, damlacıkları koalesans oluşumundan korumalıdır.
- Emülsiyonun viskozitesini artırmalıdır.
- Hidrofilik kafa ve hidrofobik kuyruk yapısına sahip olup yağ damlacıklarındaki adsorpsiyonu ile yağ/su ara yüzeyinde bağ yapmalıdır.
- Ortalama parçacık boyutu genellikle zamana bağlı olarak doğrusal artış göstermez. Bu nedenle ajanın etkinliğinin görülmesi için 24 saat veya 1 hafta gibi tahmini deneme süreleri uygulanmalıdır.
- Parçacık büyümesi bazen çok yavaş gelişebilir ve bu durum emülsiyonların uzun dönem stabilitesi hakkında yorum yapma konusunda sorun yaratabilir. Bu sebeple etkisini uzun süre sonunda kaybedeceği düşünülen bir ajan kullanıldığında, sürecin hızlı sonuçlarını görebilmek için santrifüj gibi yöntemler kullanılabilinir.
- Emülsiyonun diğer bileşenleriyle kimyasal olarak reaksiyona girmeyecek özellikte olmalıdır.
- Stabil bir emülsiyon yapabilmek adına etkili olacak minimum ajan miktarının belirlenmesi emülsiyon kapasitesinin belirlenmesi için gereklidir.
- İnsanlar için toksik ve tahriş edici olmamalıdır.
- Kokusuz, tat değiştirme konusunda nötr ve nispeten ucuz olmalıdırlar (McClements, 2007; Sarathchandraprakash vd., 2013; Kıbıcı, 2017).

Özellikle gıda üretiminde kullanılan bu ajanlar ürünlere stabilite vermek dışında ürünün tadını ve estetiğini değiştirmek, ağızda bıraktığı memnuniyet hissini geliştirmek, ısırma, çiğneme gibi süreçlerde ürün tüketiminden memnun olma duyusunu geliştirmek gibi etkilerde sağlayabilmektedir. Genellikle gıda sektöründe katkı maddeleri kategorisinde değerlendirilen bu ajanlar Avrupa Birliği'nce (EU) belirlenen ve uluslararası standartlarda kabul edilmiş olan E kodları ile etiketlerde de beyan edilmektedir. Her katkı maddesi kendileri için belirlenmiş olan E kodları ile beyan edilmektedir (Cox vd., 2021). Sektörde bir dizi gıda bileşeni emülsifiyer ajan olarak kullanılmaktadır. Bu bileşenler, emülsiyon oluşturma, stabilize etme ve çevresel strese (iyonik güç, sıcaklık, pH…) dayanma yeteneklerine bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterirler. Örneğin, jelatin, kazein, izole peynir altı suyu proteini ya da yumurta proteini gibi protein bazlı ajanlar sıklıkla yüzey aktif madde ve jelleştirme özellikleri yüzünden kullanılırken; aljinat, ksantan, gam arabik, κ-karragenan gibi polisakkarit bazlı ajanlar genellikle viskoziteyi artırmak ve jel benzeri ürünler hazırlamak için kullanılır. Tween 80 gibi sentetik yüzey aktif maddeler ise daha çok kıvam artırıcı, kıvam değiştirici, stabilizatör ve jelleştirici özellikleri itibariyle kullanılmaktadır (McClements & Gumus,

2016). Sıklıkla kullanılan bu emülsifiye edici ajanların bazıları aşağıda belirtilecektir.

3.1.1. Fosfolipitler

Fosfolipidler iyonlaşabilen emülgatörler olarak bilinir ve emülsiyonların stabilitesi ve ürünlerin/gıdaların raf ömrü için önemli olan kolloidal stabiliteyi ve gıdalar arasındaki ara yüzey etkileşimlerini artırma yeteneği özelliklerden dolayı kullanılırlar (Moran-Valero vd., 2017). En sık kullanılan doğal fosfolipidler, fosfatidilkolin (PC), fosfatidiletanolamin (PE), fosfatidilserin (PS) ve fosfatidilgliserol (PG) olarak bilinir. Kimyasal yapısı Şekil 3.2'de gösterilen fosfotidilkolin, fosfolipit bazlı fonksiyonal bileşen olarak bilinen ve sektörde lesitin olarak adlandırılan bir emülgatördür.



Şekil 3.2. *Fosfotidilkolinin/lesitinin kimyasal yapısı (Develioğlu, 2019).*

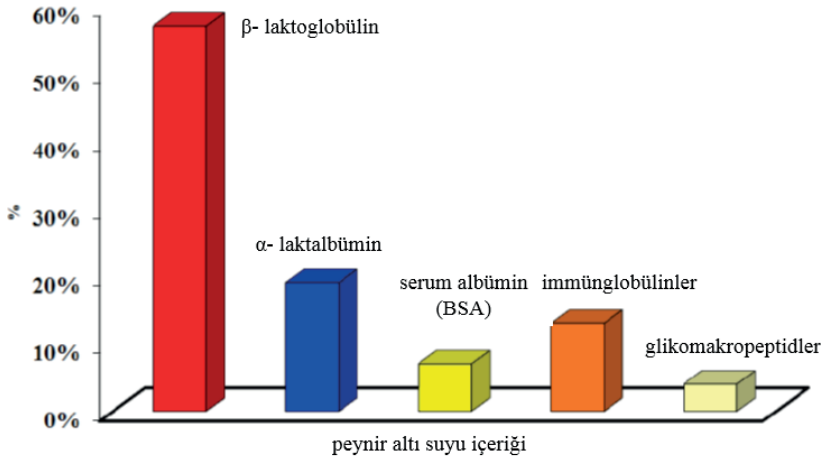
Lesitin yumurta, süt, soya fasülyesi, ayçiçeği gibi farklı kaynaklardan elde edilebilen; fosfolipitler, steroller, trigliserit ve glikolipitler gibi farklı fosfolipit ve lipofilik maddelerin tipik kombinasyonudur. İçerdiği hidrofilik ve lipofilik kısımlar itibariyle yağ-su ara yüzeyindeki yüzey gerilimini düşürme etkisine sahiptirler. Düşük veya orta seviyede hidrofilik-lipofilik denge (HLB) değerine sahip olduğundan, sadece stabilite sağlamak amaçlı kullanılacaksa başka doğal emülgatörler ile kombine edilerek kullanılmaktadır (McClements & Gumus, 2016). Aşırı ilave edilmesi durumunda, ürünlerin viskozitesini değiştirmez, ancak istenmeyen duyusal özelliklere sebep olabilir (Kıbıcı, 2017). Lesitin sahip olduğu alerjen olmayan yenilebilir özelliği nedeniyle kozmetik, gıda ve ilaç endüstrilerinde emülgatör olarak kullanılmaktadır. Gıda sektöründe sıklıkla fırıncılık ürünlerinde, şekerlemeler, sakızlar, dondurmalar ve farklı hazır gıdalarda emülgatör olarak kullanılsa da özellikle çikolata ve çikolata kaplamalarının üretimlerinde hidrofilik özellik gösteren şeker kristal yüzeyini etkileyerek viskoziteyi düşürdüğü için daha sık kullanılmaktadır (Türker vd., 2021).

3.1.2. Kazein/Sodyum Kazeinat

Sodyum kazeinat, memeli sütünün ana proteinidir ve dört kazeinin (α s1, α s2, β ve κ) karışımı olan yaygın olarak kullanılan bir emülsifiye edici ajandır. Emülsiyonun stabilitesini sterik ve elektrostatik kombinasyonu ile etkiler (Vázquez-Solorio vd., 2011). α s1 ve β, kazeinin en etkili emülsifiye edici etken maddeleridir. Emülsifikasyon sırasında ara yüzey geriliminin azaltılması ve yeni oluşan küçük damlacıkların flokülasyon ve koalesansa karşı korunması bu iki kazein bileşeniyle doğrudan ilgilidir (Damodaran, 2005; Bouyer vd., 2012). Diğer tarafta ise hava-su ara yüzeyinde adsorbe edilmiş β-kazein tabakaları viskoelastik bir davranış sergilerler (Bantchev & Schwartz, 2003).

3.1.3. Peynir altı suyu proteini

Sütün ana proteini olan kazein, sütteki proteinlerin ortalama %80'ini oluştururken, peynir altı suyu proteinleri ise sütteki proteinlerin yaklaşık olarak %20'sini temsil etmektedir. (Özcan & Delikanlı, 2011). Peynir altı suyu, peynir veya kazein üretimi sırasında kazeinin çöktürülmesi ile elde edilen yeşilimsi-sarı renkte, yarı saydam bir protein kaynağı şeklinde tanımlanabilmektedir ve içeriğinde Şekil 3.3'te kompozisyon oranları hakkında bilgi verilen β- laktoglobülin, α- laktalbümin, serum albümin, immünglobülinler ve glikomakropeptidler bulunmaktadır (Oztop vd., 2012).



Şekil 3.3. *Peynir altı suyu proteini kompozisyonu (Oztop vd., 2012)*

Peynir altı suyu proteinleri jel oluşumunu güçlendirme, kıvam artırma, emülsiyon oluşturma, serum ayrılmasını engelleme ve su tutma, köpük oluşturma, viskozite artırma gibi fonksiyonel etki gösteren özelliklere sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı peynir altı suyu proteinleri gıda sektöründeki farklı ürünlerde tekstürel özellikleri iyileştirmek, duyusal özellikleri geliştirmek ve

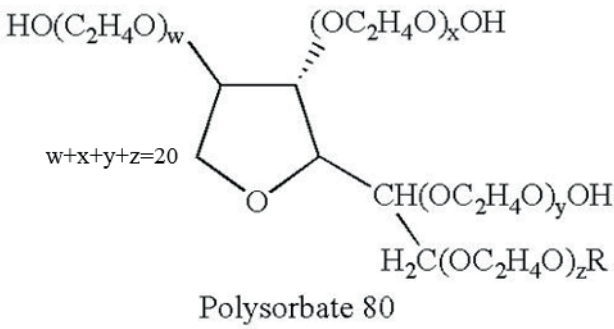
dayanıklılığı arttırmak için sıklıkla kullanılmaktadır (Develioğlu, 2019; Herceg & Lelas, 2005; Mleko & Gustaw, 2002).

Süt proteinleri, etkili emülgatör özelliklerinden dolayı sektördeki farklı gıdalarda katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Emülsifikasyon özelliği damlacıkların birbirlerine çok yaklaşıp agrege olmalarını engelleyen, yağ damlacıklarında adsorbe olan yüzey aktif protein yapısıyla alakalıdır. Bu yapı damlacıklar arasındaki itici kolloidal ilişkiyi artırarak daha stabil olmalarını sağlar (Oztop vd., 2012). Lesitin ile birlikte kullanılan peynir altı suyu protein izolatları ve hidrolizatlarının emülsiyonların kararlılık kapasitelerini arttırdığı da ayrıca bilinmektedir (Özcan & Delikanlı, 2011).

3.1.4. Tween 80/Polisorbat 80

Tween 80/polisorbat 80, gıda ve polimer endüstrilerinde kullanılan, iyonik olmayan, sentetik bir yüzey aktif maddedir (Şekil 3.4). Stabilizasyon mekanizması, yüzey aktif maddenin kısa süreler için ara yüzey gerilimini azaltma yeteneğine dayanır.

Emülsiyon stabilitesi, yüzey aktif madde moleküllerinin tüm yağ/su ara yüzünü kaplaması, ara yüzey reolojisini geliştirmesi ve bu şekilde sterik itme etkisiyle damlacık birleşmesini ve toplanmasını engellemesiyle gerçekleşir. Maksimum emülsiyon stabilitesine ulaşabilmek için gerekli olan minimum miktarın belirlenmesi emülsiyon hazırlama, üretme maliyeti üzerinde etkili olacağından, stabiliteyi geliştirme kısmından önce düşünülmesi gerekmektedir (Roldan-cruz vd., 2016).



Şekil 3.4. *Tween 80'in kimyasal yapısı*

3.1.5. Polisakkarit Bazlı Stabilize Edici Ajanlar

Polisakkaritler, bir ya da birden fazla monosakkarit türü içeren çok sayıda monosakkaritin birbirine glikozidik bağlarla bağlanması sonucu elde edilebilen doğal polimerlerdir. Hidrofilik yapıları ve büyük moleküler ağırlıkları

itibariyle polisakkaritler, emülsiyonlarda su tutma özellikleri ve emülsiyonları kalınlaştırma özellikleri ile bilinirler (Bouyer vd., 2012). Emülsiyon damlacıklarının stabilize edilmesi konusunda adsorbe eden ve adsorbe etmeyen polisakkaritler olmak üzere iki grupta kategorize edilebilirler. Adsorpsiyon yapmayan polisakkaritler jelleşme ile ya da sulu sürekli fazın viskozitesini değiştirerek damlacıkların hareketini yavaşlatarak emülsiyon stabilitesinde etkili olur. Adsorbe etmeyen polisakkaritlere örnek olarak ksantan zamkı, alginatlar, karragenanlar ve kitosan verilebilir. Adsorbe eden polisakkaritler ise yağ damlacık yüzeyinde adsorpsiyon ile emülsiyonları stabilize eden ve ardından damlacıkların elektrostatik ve/veya sterik itici kuvvetlerle flokülasyon ve birleşme fazına geçişlerini engelleyen polisakkaritlerdir. Gam arabik, guar gam, pektin, hidroksipropilmetilselüloz (HPMC), modifiye nişasta sıklıkla kullanılan adsorbe eden polisakkarit örnekleridir. Bazı polisakkaritlerin yapısında bulunan protein içeriği, o polisakkaritlerin emülsiyonları stabile etme potansiyellerini artırmaktadır (Shao vd., 2020).

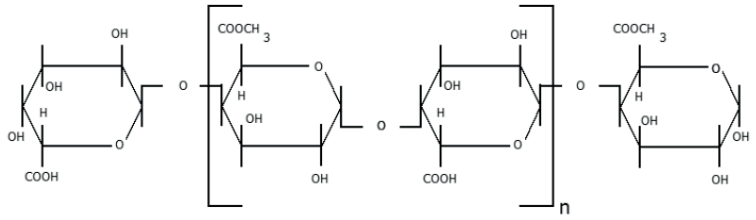
3.1.5.1. Gam arabik

Günümüzde gıda endüstrisinde sıklıkla kullanılan emülsifiye edici, stabilize edici ajan olan gam arabik/arap sakızı doğal bir polisakkarittir (Williams & Phillips, 2009).

Çok sayıda polar polisakkarit zincirin bağlı olduğu polar olmayan polipeptid omurgası itibariyle, arap zamkı amfifilik olarak bilinmektedir. Emülsifikasyon sırasında yağ damlacıkları yüzeyinde adsorbe olduktan sonra, polipeptid zincir yağ faza doğru çıkıntı yapmaya başlar ve polisakkarit zincirler suya salınır. Bu durum yağ damlacıklarının etrafında nispeten kalın hidrofilik bir kaplama oluşturur. Bu kaplama da güçlü sterik etki ile damlacıklara toplanmaya karşı stabilite kazandırır (Mcclements & Gumus, 2016; Shao vd., 2020).

3.1.5.2. Pektin

Pektin molekülü α-D galaktronik asit ünitelerinin birbirlerine bağlanmaları ile oluşan uzun zincirli bir yapıdır (Sekil 3.5). Pektin, gıda endüstrisinde yaygın olarak jelleştirme, su içinde yağ emülsiyonlarının stabilizesini sağlama ve gıda ürünlerini tekstüre etme için kullanılan iyi bilinen bir hidrokolloiddir (McClements & Gumus, 2016; Schmidt vd., 2015).



Şekil 3.5. *Pektinin moleküler yapısı*

Bitkilerde doğal yapısında bulunabilen pektin, genellikle bitkilerin hücre duvarlarında selüloz ile birlikte çözünmez protopektin yapısında bulunmaktadır. Meyve olgunlaşırken protopektin yapısı pektine dönüşmektedir (Ketenoğlu & Tekin, 2012). Meyve ve sebzelerin yapısında yaygın olarak bulunan pektik bileşiklere dair kaynak ve içerik örnekleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir. Pektin içeriği en fazla olan gıdalar arasında turunçgil kabukları, elma posası, şeker pancarı küspesi ve ayçiçeği tohum tablaları yer almaktadır (Shao vd., 2020). Dünyada üretilen pektinin büyük çoğunluğu gıda sanayinde, asidik koşullar altında jel oluşturma potansiyeli itibariyle özellikle reçel yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca proteinlerle birlikte kullanıldığında emülgatör/stabilizatör özelliğine de sahiptir (Ketenoğlu & Tekin, 2012; Schmidt vd., 2015).

Tablo 3.1. *Bazı gıda maddelerinin içerdikleri pektin miktarları (g /100 g) (Ketenoğlu &Tekin, 2012)*

Gıda	Pektin miktarı (g / 100 g)
Elma	0.39-0.49
Elma posası	15-20
Muz	0.55-0.68
Üzüm	0.7
Greyfurt	0.65
Limon	0.63
Portakal	0.57
Havuç	0.72-1.01
Kivi	0.85
Ayçiçeği tablası	25.0

3.1.5.3. Guar Gam

Guar bitkisinde yer alan tohumlardan elde edilen, mannan ve galaktozun birbirine glikozid bağlarıyla bağlanması ile oluşan, yüksek molekül ağırlığına sahip doğal bir hidrokolloid polisakkarit olan guar gam, kimyasal olarak galaktomannan adıyla anılmaktadır. Sıcak veya soğuk suda çözünebilme özelliği vardır. Çözünme sonrası viskoziteyi artırma özelliğine sahiptir. Gıda endüstrisinde emülsifiye edici ve kıvam artırıcı özelliklerinden dolayı yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Guar gamın sahip olduğu kıvam artırıcı özelliği sektörde kullanılan pek çok polisakkaritten daha etkilidir. Örneğin mısır nişastasının yaklaşık 8 katı kıvam artırma gücüne sahip olduğundan dolayı soslarda, süt ürünlerinde ve özellikle dondurmada ısı değişimlerinden kaynaklanan istenmeyen etkileri minimize etmek için sıklıkla tercih edilmektedir (Ketenoğlu & Tekin, 2012). Sektörde kullanılan en uygun fiyatlı stabilizatörler arasındadır. Genellikle % 0.1- 0.2 oranlarında kullanılması bile güçlü bir stabilize edici etki göstermektedir (Bahramparvar & Mazaheri Tehrani, 2011).

3.1.5.4. Akasya gamı

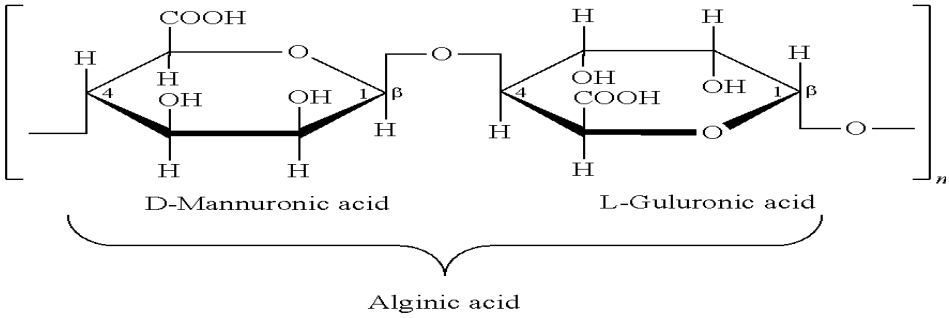
Acacia senegal başta olmak üzere bazı akasya ağaçlarının gövdelerinden ve dallarından sızan reçine kurutularak elde edilen akasya gamı arabinoz,

galaktoz, glukronik asit ve ramnozdan oluşmaktadır. Akasya gamının gıda endüstrisinde emülgatör özelliği nedeniyle uzun yıllardır kullanıldığı bilinmektedir. Ancak emülsiyon sistemlerdeki çalışma mekanizmasının detayları son yıllarda açığa çıkarılmıştır. Bu bağlamda, bir emülsiyon sistemde yer alan akasya gamının, yağ/su ara yüzeyinde oluşturduğu kalın viskoelastik filmler sayesinde emülgatör özelliği gösterdiği bilinmektedir. Bu emülgatör özelliğin emülsiyonun yüzey reolojik özelliklerini ve stabilitesini etkileme potansiyelinin ise kullanılan akasya gamının içerdiği protein miktarına ve molekül ağırlığına bağlı olduğu belirtilmiştir (Ketenoğlu & Tekin, 2012). Gıda sektöründe özellikle şekerleme ürünlerinin üretiminde emülgatör ve kaplama maddesi olarak kullanılan akasya gamı, sıklıkla ekmek yapımında kaplama materyali olarak, turunçgilli ve kolalı içeceklerin üretiminde emülgatör olarak, aroma maddelerinin muhafazasında koruyucu olarak farklı ürünlerde, farklı amaçlarla kullanılmaktadır.

3.*1.5.5. Aljinat*

Aljinat ilaç sistemlerinde ana emülsiyon stabilizatör bileşeni olarak kullanılan doğal olarak oluşan başlıca polisakkaritlerden biridir. Bu lineer polisakkarit, birçok deniz yosunu türünden izole edilmektedir ve kahverengi deniz yosunlarının yapısındaki hücre duvarlarında magnezyum, kalsiyum, potasyum ve sodyumun çözünmeyen tuzları formlarında bulunmaktadır. Ticari olarak aljinat sodyum tuzu veya aljinik asit olarak temin edilebilinmektedir (Bahramparvar & Mazaheri Tehrani, 2011). Aljinatlar farklı alg çeşitlerinden elde edilebildiği için farklı fizikokimyasal özelliklere sahip olabilirler. Hidrofilik kolloidal karbonhidrat polimeri olan aljinatların bileşiminde Şekil 3.6'daki gibi değişebilen 1-4-bağlı β-D-mannuronik ve α-L-guluronik asit kalıntılarının dallanmamış ikili kopolimerler bulunmaktadır (Shanura vd., 2019).

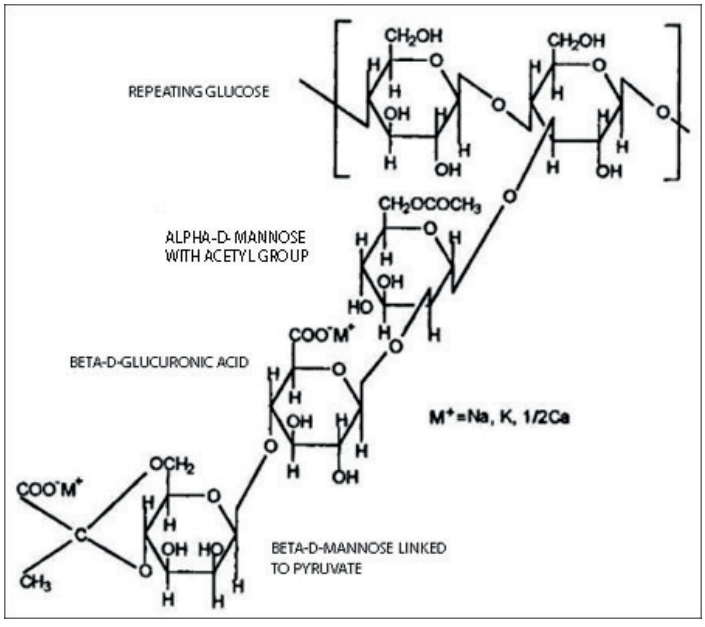
Aljinik asit bünyesinde metal katyonları ile etkileşime girip güçlü jel ya da çözünmeyen polimerler üretme yeteneği sağlayan karboksil asit barındırmaktadır (Ozel vd., 2017). Bu nedenle, aljinatın güçlü bir koyulaştırıcı, stabilize edici ve jel oluşturucu ajan olduğu açıktır. Bu anyonik polisakkaritler, kalsiyum katyonları ile tepkimeye girdiklerinde çapraz bağ oluşumuyla mikroküreler oluşturmakta ve bu sayede güçlü, esnek jeller oluşturmaktadır (Develioğlu, 2019; Shao vd., 2020).



Şekil 3.6. *Aljinat/aljinik asitin moleküler yapısı*

3.1.5.6. Ksantan

Xanthomonas campestris tarafından üretilen Ksantan sakızı, ana zinciri glikoz birimlerinden oluşan bir hetero-polisakkarittir. Yan zinciri ise Şekil 3.7'de gösterildiği şekilde bir asetil grubu, β-D-glukuronik asit ve β-D-mannoz birimlerinin bir pürivat grubu ile bağlandığı α-D-mannozdan oluşan bir trisakkarittir.



Şekil 3.7. *Ksantanın moleküler yapısı*

Ksantan gamı emülsiyonlarda kullanıldığında yağ/su ara yüzünde adsorbe etmeyen yani adsorbe edici olmayan bir polisakkarittir (Kirtil & Oztop, 2016). Emülsiyonları kalınlaştırmak, flokülasyon ve kremleşme ile çökelme (sedimentasyon) hızlarını azaltarak stabilize etmek ve sulu fazın fiziksel stabilitesini ve/veya viskozitesini arttırmak amaçlarıyla kullanılan, sektörde

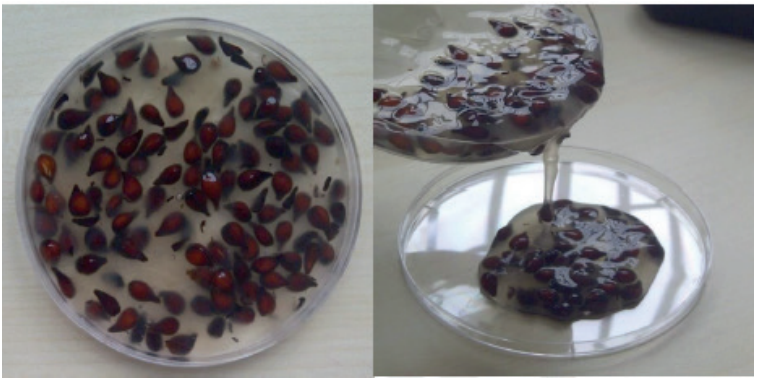
kullanımı en çok tercih edilen polisakkaritlerden birisidir (Bouyer vd., 2012; Kumar vd., 2016). Ksantanın özel yapısı gama akma gerilimi, kayma incelmesi ve tiksotropik davranışlarla birlikte olağandışı koyulaştırma özellikleri verir. Bu özel reolojik özellikler itibariyle ksantan gamı mükemmel bir emülsiyon stabilizörü olarak kabul edilmektedir (Sun vd., 2007). Ksantan zamkı koyulaştırma ya da emülsifikasyon kabiliyetlerinin yanı sıra asit, alkali, tuzlar ve sıcaklığa karşı da stabil olabildiğinden dolayı gıda, ilaç, kozmetik, gibi sektörler başta olmak üzere ve diğer pek çok endüstri alanında yaygın biçimde kullanılmaktadır (Wang vd., 2017).

3.1.5.7. Karragenan

Kırmızı deniz yosunlarından ekstraksiyon ile elde edilen polisakkaritlerin ortak adıdır. Elde edildiği tür ya da moleküldeki sülfat miktarına göre kapa, iota ve lambda karragenan türleri mevcuttur. Sektörde jelleşme özelliği ile en sık kullanılan türü kapa-karragenandır. Koyulaştırma, jelleştirme, viskoziteyi artırma özellikleri vardır (Tekinşen & Tekinşen, 2008; Sarathchandraprakash vd., 2013). Karragenanın birçok emülsiyon sistemde faz ayrılmasını önlemek için %0.01–0.02 seviyelerinde kullanılması yeterli olmaktadır (Bahramparvar & Mazaheri Tehrani, 2011).

3.1.5.8. Alternatif bir ajan olarak ayva çekirdeği müsilajı

Ayvanın kahverengi çekirdekleri içerisinde pek çok aminoasit, fenolik bileşen ve askorbik, malik, sitrik asit gibi antioksidan bileşenler barındırmaktadır. Diğer tarafta çekirdeklerim beyazımsı müsilaj yapısı suyla adsorbe edildiğinde yapışkan ve lezzetsiz bir sıvı oluşturmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. *Ayva çekirdeği müsilajının suyla teması sonrası gerçekleşen jelleşme etkisi (Develioğlu, 2019)*

Ayva çekirdeği müsilajı polisakkaritler ve glutamik asit ile aspartic asit gibi aminoasitlerin selülozik fraksiyonunu içeren kompleks bir karışımdır.

Yapılan araştırmalar ayva çekirdeği müsilajının temel bileşenlerinin selüloz ve glukanlara, galakto-glukanlara, manoglukanlara veya galakto-manno-glukanlara, asidik arabinoksilanlara ve yüksek glukuronik asit kalıntılarına ayrılan suda çözünür polisakkaritler olduğunu göstermiştir.

Eşsiz kolloidal özellikleri, düşük üretim maliyeti ve kolay ekstraksiyonu göz önüne alındığında diğer polimerlerin çoğuna göre bu polisakkarit, potansiyel bir stabilizatör, film veya kaplama bileşeni olarak ilgi çekicidir. Abbastabar ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada (2015), müsilajın büyük bir jelleşme kapasitesi gösterdiği ve çözeltiler üzerinde gelişmiş bir viskozite davranışı sergilediği ortaya çıkmıştır. Protein içeriği yıllardır bilinen ayva çekirdeği müsilajının emülsifiye edici özelliği son yıllarda büyük ölçüde dikkat çekmeye devam etmektedir ve yapılan çalışmalar ayva çekirdeği müsilajının emülsiyon sistemlerde yağ-su ara yüzeyinde adsorbe olabilen polimer özelliği gösterdiğini kanıtlamıştır (Develioglu vd., 2020; Kirtil & Oztop, 2016).

4. EMÜLSİYONLARIN STABİLİTESİNDE KULLANILAN EMÜLSİFİKASYON TEKNİKLERİ

Emülsiyonların stabilitelerinin devamlılığı için kullanılan yüzey aktif maddeler, diğer adıyla emülsifiye edici ajanlar, ara yüzey gerilimini düşürüp emülsiyon damlacıklarının birleşmesini engelleme ve/veya viskozite üzerinde etki oluşturarak stabilite sağlamaktadırlar. Emülsiyonların stabilitesinde ya da emülsifikasyon sürecinde başarılı olunabilmesi adına emülsiyonun hazırlanmasında kullanılan yöntemler de etkili olmaktadır. Genellikle damlacık boyutlarını küçülterek stabilite sağlama mantığıyla kullanılan pek çok teknik mevcuttur (Taha vd., 2020). İlaç, kozmetik, biyoteknoloji ve gıda teknolojilerindeki nano partiküllerin kullanılmasına dair gelişmeler ile emülsifikasyon teknikleri ve stabilizasyon mekanizmalarındaki iyileşmelerin de etkisiyle bu tekniklere karşı gittikçe artan bir ilgi mevcuttur (Çınar, 2017). Stabilitenin sağlanabilmesi için emülsiyon sistemlerin küçülen parçacık boyutları ile homojen bir yapıya geçmeleri gerekmektedir. Sektörde ve literatürde en çok kullanılan emülsifikasyon teknikleri ise yüksek hızlı karıştırıcılar, yüksek basınç homojenizatörleri, mikrosıvılaştırıcılar, kolloid değirmenleri ve ultrases/ultrason homojenizatörleri, (Taha vd., 2020).

4.1. Yüksek Hızlı Karıştırıcılar

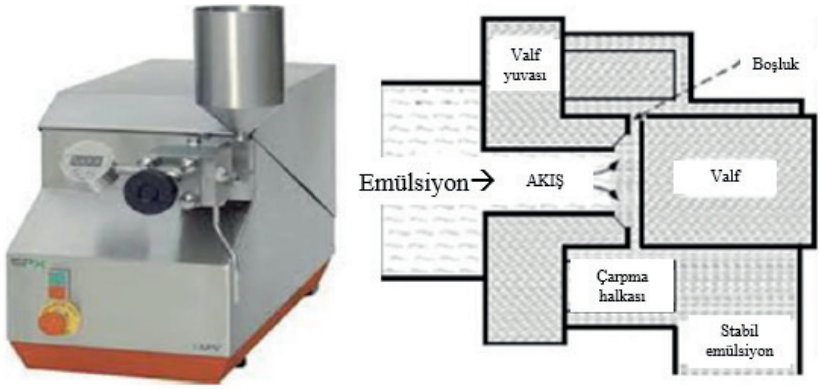
Yüksek hızlı karıştırıcılar/homojenleştiriciler, düşük ya da orta enerjili emülsifikasyon cihazları kategorisinde kabul edilir. Bu cihazlar sektör kullanımlarına göre (laboratuvar ya da endüstriyel amaçla kullanımlarına göre) dakikada 1000 ile 25000 dönüş sağlayacak kadar farklı ebatlarda üretilebilmektedir. Laboratuvarda yaygın olarak kullanılan cihazlarda yavaş kimyasal reaksiyonlarla kaba emülsiyonlar üretmek ve dispers ile sürekli fazın arasındaki hidrodinamik etkileşin devamlılığını sağlamak amaçlanır. Emülsifikasyon prosesi sırasında, karıştırıcının kafası rotasyonel, boylamsal veya radyal

hız eğrileri ile çalışarak büyük damlacıkları daha küçük formlara ulaştırır. Bu cihazlar ucuz ve kullanımları kolay cihazlar olduklarından dolayı avantajlı sayılırlar. Fakat limitli kapasiteleri ve diğer sistemlere göre emülsiyonların daha büyük damlacık boyutunda kalmaları sistemlerin dezavantajları olarak ortaya çıkmaktadır. Damlacık boyutu sorununu çözebilmek adına dönüş hızını ve homojenizasyon süresini artırarak damlacık boyutunu küçültme çalışmaları yapılabilinmektedir (McClements, 2005; Modarres-Gheisari vd., 2019; Taha vd., 2020).

4.2. **Yüksek Basınçlı Homojenizatör**

Sürekli homojenleştirme cihazları olarak da bilinen yüksek basınç valfi homojenizatörleri farklı endüstrilerde emülsiyonlar üretebilmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu cihazlar homojenleştirme valfi ve yüksek basınç pompasından oluşurlar ve akışkan sistemlerine 3 ila 500 MPa arasında basınç uygularlar (Salehi, 2020). Pompa, şiddetli türbülans oluşturan bir akış sağlayarak emülsiyonunu sıkıştırır ve damlacık boyutu 0.1 ile 1 μm arasında değişebilen ince emülsiyonlar üretir (Taha ve ark 2020). Yüksek basınç valfi homojenizatörleri stabil emülsiyonlar hazırlamanın yanı sıra gıda ürünlerinin fiziksel özelliklerini de değiştirmek için kullanılmaktadır (Salehi, 2020; Taha vd., 2020).

Homojenizasyon prosesinde, emülsiyon homojenizasyon valfi ve çarpma halkası boyunca yer alan ince bir boşluktan geçerek ilerler (Şekil 4.1). Bu valfin hızlıca açılıp kapanmasıyla emülsiyonda meydana gelen yüksek oranda basınç düşüşü ile kayma-parçalama kuvvetlerine maruz kalır ve emülsifikasyon meydana gelir. Emülsiyondaki parçacık boyutlarında gerçekleşen küçülme, basınç düşüşü ile oluşan türbülansın akışına ve partiküllerin birbirine çarpışmasına bağlı olarak gerçekleşir. Bununla birlikte, emülsifikasyon oranı, homojenizatörde uygulanan basınca ve emülsiyonun homojenizatörden geçiş sayısı bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Kurtuluş, 2019).



Şekil 4.1. *Yüksek başınçlı homojenizatörün iç ve dış görünümü (Kurtuluş, 2019)*

4.3. **Mikrosıvılaştırıcı**

Geleneksel olarak eczacılık alanında emülsiyonların hazırlanmasında, hücre parçalama işlemlerinde, lipozomal ürünlerin üretilmesinde kullanılan mikrosıvılaştırma tekniği, gıda ve süt endüstrisinde ise genellikle tatlandırıcı emülsiyonlarının hazırlanmasında ve homojenize süt üretiminde kullanılmaktadır (Kalia vd., 2014).

Mikroakışkanlaştırıcı ya da mikrosıvılaştırıcı cihazlar, 2000 psi'ye kadar basınca sahip hava tahrikli bir yoğunlaştırıcı pompa ve bir etkileşim odasından oluşan yüksek enerjili bir emülsifikasyon cihazı olarak kabul edilir. Pompa etkileşim odasından geçerken nano boyuta ulaşan emülsiyonu mikro kanallardan geçirmek için sıkıştırır (Taha vd., 2020). Yüksek basınçlı valf homojenleştiricilere benzer şekilde, mikroakışkanlaştırıcılar da nanoemülsiyonlar üretmek ve gıda maddelerinin fizikokimyasal özelliklerini değiştirmek için kullanılmaktadır (Guo vd., 2020). Homojenizasyonun ve homojenizasyon işlemine bağlı olarak emülsiyon stabilitesinin sağlanabilmesi için homojenizasyon işleminin yani emülsiyonun cihazdan geçiş sayısının artırılması gerekmektedir.



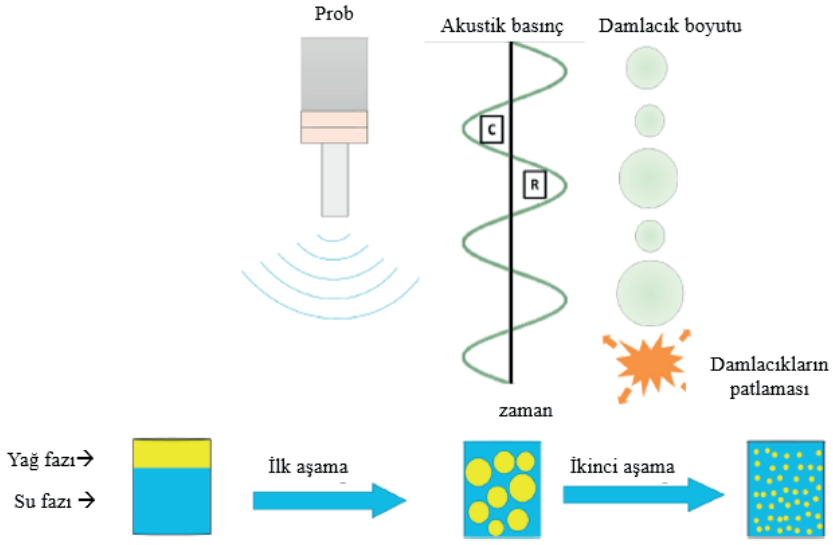
Şekil 4.2. *Mikrosıvılaştırıcı cihazının dış ve iç görünüşü (Kurtuluş, 2019)*

4.4. **Ultrason / Ultrases**

Yüksek yoğunluktaki ultrason emülsifikasyon cihazları, geleneksel emülsifikasyon cihazlarına göre gösterdiği faydalar sebebiyle sektör kullanımı artan ısısal olmayan (non-thermal) cihazlardandır. Enzim ekstraksiyonu ve inaktivasyonu, mikroorganizma inhibisyonu, kurutma, dondurma, filtrasyon, tenderizasyon, homejenizasyon/emülsifikasyon gibi uygulamalar ultrason teknolojisinin sıklıkla kullanıldığı alanlardan bazılarıdır (Yüksel, 2013). Yüksek enerji verimi, başarılı emülsiyon stabilitesi ve sağladığı kullanım ve temizleme kolaylıkları bu cihazların en sık karşılaşılan faydaları arasında bulunmaktadır (Li vd., 2017).

Ultrases teknolojisi insan kulağının işiteceği eşik miktarın üzerindeki ses dalgalarına bağlı olarak çalışmaktadır (>16 kHz) (Yüksel, 2013). Gıda sektöründe ve özellikle emülsiyonlarda 20 ila 100 kHz arası frekans kullanılırken; kimyasal reaksiyon içeren sistemlerde ya da ilaç ve atık yönetimi endüstrilerinde kullanılan frekans 300 ila 500 kHz arasında değişebilmektedir (Zhang vd., 2019).

Ultrason cihazlarında elektronik olarak üretilen mekanik enerji ve yüksek frekans, yüksek frekans ile titreşim yapan metal bir prob aracılığıyla malzemeye aktarılır. Yüksek frekans titreşimi ile oluşan lokal yüksek basınç bölgeleri sayesinde kavitasyon oluşumu ve sıkıştırma meydana gelir (Kurtuluş, 2019). Yani ultrason cihazlarının ürettiği akustik kavitasyon, sistemdeki hava kabarcıklarının oluşumu ve çökmesi anlamına gelmektedir. Hava kabarcıklarının çöküşü, kimyasal reaksiyonları teşvik eden reaktif radikallerin salınmasını kolaylaştırabilir. Akustik kavitasyon kabarcıklarının salınımı ve çökmesi ise ortamda yüksek hızlı sıvı aktarımı, yüksek sıcaklık, basınç, türbülans gibi çeşitli fiziksel etkilerin oluşmasına sebep olur (Ashokkumar, 2011). Bu değişimler uygulamanın özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin, emülsifikasyon ve ekstraksiyon proseslerinde akustik kavitasyon ile oluşturulan fiziksel etkiler kullanılır. Ultrason tekniği, akustik kavitasyon ile yağ damlacıklarını etki ederek, O/W emülsiyonlarda damlacık boyutlarını küçülterek stabil bir emülsiyon oluşmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.3. *Akustik kavitasyon prosesinin emülsifikasyon sürecindeki etkisinin şematik diyagramı (Taha vd., 2020)*

Yüksek yoğunluklu ultrason sistemi ile emülsiyon hazırlanması Şekil 4.3'te gösterildiği üzere iki aşama ile gerçekleşmektedir: Birinci aşamada dis-

pers fazın büyük damlacıkları sürekli fazın içinde oluşur ve ikinci aşamada ise devam eden kayma (shear) ve akustik kavitasyon etkisi ile ortamdaki büyük damlacıkları parçalanıp daha küçük formlara dönüşürler (Leong vd., 2018; Taha vd., 2020).

Sonikasyon sırasındaki kavitasyonun etkisi emülsifikasyon sürecinin verimini etkilemektedir. Ultrason frekansı, gücü, sıcaklığı, ön emülsifikasyon süreci ve ortamın viskozitesi ya da yüzey gerilimi gibi kavitasyonu etkileyen durumlar emülsiyon stabilitesini de etkileyecektir. Örneğin artırılan sonikasyon gücü, artan kavitasyon etkisi ile yağ damlacıklarının üzerindeki etkiyi artıracak ve emülsiyonun stabilitesini destekleyecektir (Ashokkumar vd., 2016). Bu yöntemle basit O/W emülsiyonlar dışında çoklu emülsiyonlarda, protein içerikli emülsiyonlarda ve polisakkarit içerikli emülsiyonlarda da stabilite sağlanmaktadır. Kullanılan sistemin özellikleri kadar, kullanılan yağ ve su fazındaki ürünler ve birbirlerine olan oranları ile yüzey aktif maddelerin özellikleri de damlacık boyutlarındaki değişimi ve buna bağlı olarak elektrostatik çekimi etkileyerek emülsiyon stabilitesi sürecini etkileyecektir (Cucheval & Chow, 2008). Örneğin, emülsifiye edici ajan olarak protein kaynaklı bir ürün kullanıldıysa ultrason sistemi proteinin çözünürlüğünü etkileyerek; polisakkarit kaynaklı bir ajan kullanıldıysa ara yüzey gerilimini azaltarak stabilizasyon sürecinde etkili olacaktır (Taha vd., 2020).

Özetle endüstride uygulanan emülsiyon işlemlerinin uzun sürmesi, işçilik gerektirmesi, kullanılacak emülsiyonları stabile edici ajanların bulunmasında yaşanan sıkıntılar ve maliyet yönetimi itibariyle ultrases işlemi endüstri için potansiyel bir alternatiftir. Fakat bu yöntemin düşük viskoziteye sahip sıvılar ile hazırlanan emülsiyonlar için daha pratik ve daha başarılı olacağı unutulmamalıdır (Güngör vd., 2013; Yüksel, 2013).

5. SONUÇ

Emülsiyon sistemler, literatür çalışmaları ve buna bağlı olarak kozmetikten gıda sektörüne, petrolden ilaç sektörüne, biyoteknolojiye kadar farklı pek çok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle gıda ve ilaç sektöründe çokça kullanılan enkapsülasyon tekniklerinin başarılı sonuçlar verebilmesi için pek çok bilim dalıyla ortak paydası olan emülsiyon sistemlerinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

Emülsiyonların temelini oluşturan yağ ve su gibi birbirine karışmayan iki fazın bir arada olması emülsiyonların stabilitesinin sağlanması ya da stabilitesinin devamlılığı için yeterli olmayacaktır. Kullanılacak sektörün özellikleri, karşılanması beklenilen ihtiyaçlar, hazırlanan emülsiyonun kullanılacağı ya da sürecinin değerlendirileceği alan gibi konu başlıkları göz önüne alındığında emülsiyonun başarılı bir emülsifikasyon süreci ve stabilite sağlayabilmesi için doğru emülsifiye edici ajanların seçilmesi gerektiği unutulmamalıdır. Bazen bu ajanlar karıştırılarak da kullanılabilinmektedir. Kullanılan ajanlar

emülsiyon sistemdeki damlacıkların boyutunu küçültmek ya da emülsiyonun viskozitesini artırmak odaklı çalışarak stabilite sağlamaktadır. Fakat stabilite ve devamlılığı için sadece ajan kullanmanın yeterli olamayacağı sistemler de mevcuttur. Bu durumda ajanlara ek olarak parçacık boyutlarını küçülterek, emülsiyonun homojenitesini artırmayı sağlayan farklı homojenizasyon yöntemlerine başvurulmaktadır. Yüksek hızlı karıştırıcılar, ultrases sistemleri, yüksek basınç sistemleri gibi kullanılan hammaddelerin özelliklerine ve emülsiyonun kullanılacağı sektöre göre farklı sistemler bulunmaktadır.

Gelişen ve değişen endüstriyel sektörler için emülsiyon sistemler, sistemlerin stabilitesi, stabilizasyon sağlayacak yeni ajanların ve yeni mekanik ya da kimyasal yöntemlerin keşfi gibi pek çok yeni çalışma ve araştırma yapılmaya devam etmektedir.

KAYNAKÇA

Abbastabar B, Azizi MH, Adnani A, Abbasi S, 2015. Determining and modeling rheological characteristics of quince seed gum. Food Hydrocolloids, 43, 259–264.

Akbari S, Nour AH, 2018. Emulsion types, stability mechanisms and rheology: a review. International Journal of Innovative Research and Scientific Studies, 1 (1), 14-21.

Ashaolu TJ, 2021. Nanoemulsions for health, food, and cosmetics: a review. Environ Chem Lett 19, 3381–3395.

Ashokkumar M, 2011. The characterization of acoustic cavitation bubbles - an overview. Ultrasonics Sonochemistry, 18(4), 864–872.

Ashokkumar M, Cavalieri F, Chemat F, Okitsu K, Sambandam A, Yasui K, 2016. Handbook of ultrasonics and sonochemistry. Handbook of ultrasonics and sonochemistry. Springer US.

Attri S, Sharma S, Sharma U, Srivastava M, Sonkar SC, Singh M, Bhukya P, 2021. Use of lipids, polymers, and peptides for drug delivery and targeting to cancer cells or specific organs. In: Handbook of Research on Advancements in Cancer Therapeutics, Ed: Kumar S, Rizvi M, Verma S, IGI Global, p. 276-289.

Bahramparvar M, Mazaheri Tehrani M, 2011. Application and Functions of Stabilizers in Ice Cream. Food Reviews International, 27, 4, 389-407.

Bantchev GB, Schwartz DK, 2003. Surface shear rheology of β-casein layers at the air/solution interface: formation of a two-dimensional physical gel. Langmuir 19, 2673-2682.

Berton-Carabin CC, Ropers MH, Genot C, 2014. Lipid oxidation in oil-in-water emulsions: ınvolvement of the ınterfacial layer. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 13(5), 945-977.

Bouyer E, Mekhloufi G, Rosilio V, Grossiord JL, Agnely F, 2012. Proteins, polysaccharides, and their complexes used as stabilizers for emulsions: alternatives to synthetic surfactants in the pharmaceutical field? International Journal of Pharmaceutics, 436(1–2), 359–378.

Chung C, McClements DJ, 2014. Structure–function relationships in food emulsions: improving food quality and sensory perception. Food Structure 1(2), 106-126.

Cox S, Sandall A, Smith L, Rossi M, Whelan K, 2021. Food additive emulsifiers: a review of their role in foods, legislation and classifications, presence in food supply, dietary exposure, and safety assessment. Nutr Rev, 79, 6, 726-41.

Cucheval A, Chow RC, 2008. A study on the emulsification of oil by power ultrasound. Ultrason Sonochem, 15, 5, 916-20.

Çınar K, 2017. A review on nanoemulsions: preparation methods and stability. Trakya University Journal of Engineering Sciences, 18(1), 73-83

Damodaran S, 2005. Protein stabilization of emulsions and foams. Journal Of Food Science, 70(3), 54-66.

Develioğlu İA, 2019. Investigating the effect of quince seed powder on alginate hydrogels by magnetic resonance. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği ABD, Ankara.

Develioglu IA, Ozel B, Sahin S, Oztop MH, 2020. NMR Relaxometry and magnetic resonance imaging as tools to determine the emulsifying characteristics of quince seed powder in emulsions and hydrogels. International Journal of Biological Macromolecules, 164, 2051-61.

Dickinson E, 2009. Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. Food Hydrocolloids 23(6), 1473-1482.

Dickinson E, 2010. Food emulsions and foams: Stabilization by particles. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 15, 1-2, 40-9.

Fanun M, 2009. Properties of microemulsions with sugar surfactants and peppermint oil. Colloid Polymer Science, 287, 899-910.

Guzey D, McClements DJ, 2006. Formation, stability and properties of multilayer emulsions for application in the food industry. Adv Colloid Interface Sci, 128-130, 227-48.

Guo X, Chen M, Li Y, Dai T, Shuai X, Chen J, 2020. Modification of food macromolecules using dynamic high pressure microfluidization: a review. Trends in food science & technology.

Güngör Ö, Zungur A, Koç M, Ertekin FK, 2013. Emülsiyonların özellikleri ve emülsifikasyon kosullarının aroma ve yağların mikroenkapsülasyonu üzerine etkisi. Akademik Gıda 11(2), 116-124.

Herceg Z, Lelas V, 2005. The influence of temperature and solid matter content on the viscosity of whey protein concentrates and skim milk powder before and after tribomechanical treatment. Journal of Food Engineering, 66(4), 433-438.

Jiménez-Colmenero F, 2013. Potential applications of multiple emulsions in the development of healthy and functional foods. Food Research International, 52, 64–74.

Kalia S, Boufi S, Celli A, Kango S, 2014. Nanofibrillated cellulose: surface modification and potential applications. Colloid and Polymer Science, 292(1), 5-31.

Karasu S, 2015. Soğuk pres yağlar kullanilarak üretilen salata soslarinin kalite özelliklerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ.

Ketenoğlu O, Tekin A, 2012. Bazı bitkisel liflerin gıda emülsiyonları üzerine etkileri. Akademik Gıda 10(4),60-64.

Khan MF, Sheraz MA, Ahmed S, Kazi SH, Ahmad I, 2014. Emulsion separation, classification and stability assessment. Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, 2(2), 56-62.

Kıbıcı D, 2017. Effect of the type of the emulsıfıer on the physical and chemical stability of oil-in-water emulsions. Yüksek Lisans Tezi, Yeditepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kirtil E, Oztop MH, 2016. Characterization of emulsion stabilization properties of quince seed extract as a new source of hydrocolloid. Food Research International, 85, 84–94.

Kumar P, Khouryieh H, Williams K, Conte E, 2016. Effect of xanthan / enzyme-modified guar gum mixtures on the stability of whey protein isolate stabilized fish oil-in-water emulsions. Food Chemistry, 212, 332–340.

Kurtuluş OÇ, 2019. Farkli karboksil ve aldehit içeriğine sahip nanofibril selülozlarin kitosan, jelatin ve aljinat katkili aerojellerinin üretimi ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Lambrich U, Schubert H, 2005. Emulsification using microporous systems. Journal of Membrane Science, 257, 1-2, 76-84.

Leong TSH, Manickam S, Martin GJO, Li W, Ashokkumar M, 2018. Ultrasonic production of nano-emulsions for bioactive delivery in drug and food applications. Springer.

Li W, Leong TSH, Ashokkumar M, Martin GJO, 2017. A study of the effectiveness and energy efficiency of ultrasonic emulsification. Physical Chemistry Chemical Physics, 20(1), 86–96.

Liu Q, Huang H, Chen H, Lin J, Wang Q, 2019. Food-grade nanoemulsions: preparation, stability and application in encapsulation of bioactive compounds. Molecules, 24, 1-37.

McClements DJ, 1999. Food emulsions: principles, practices, and techniques. Washington, DC: CRC Press INC.

McClements DJ, 2005. Food emulsions: principles, practices, and techniques. CRC series in contemporary food science (3rd ed.). CRC Press.

McClements DJ, 2007. Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability. Crit Rev Food Sci Nutr, 47, 7, 611-49.

McClements DJ, Gumus CE, 2016. Natural emulsifiers — biosurfactants, phospholipids, biopolymers, and colloidal particles: molecular and physicochemical basis of functional performance. Advances in Colloid and Interface Science, 234, 3–26.

McClements DJ, Rao J, 2011. Food-grade nanoemulsions: formulation, fabrication, properties, performance, biological fate, and potential toxicity. Crit Rev Food.

Mleko S, Gustaw W, 2002. Rheological changes due to substitution of total milk proteins by whey proteins in dairy desert. Journal of Food Science and Technology, 39 (2), 170-172.

Modarres-Gheisari SMM, Gavagsaz-Ghoachani R, Malaki M, Safarpou, P, Zandi M, 2019. Ultrasonic nano-emulsification – a review. Ultrasonics Sonochemistry, 52, 88–105.

Moran-Valero MI, Ruiz-Henestrosa VMP, Pilosof AMR, 2017. Synergistic performance of lecithin and glycerol monostearate in oil/water emulsions. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 151, 68–75.

Muschiolik G, Dickinson E, 2017. Double emulsions relevant to food systems: preparation, stability, and applications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 16(3), 532–555.

Ozel B, Uguz SS, Kilercioglu M, Grunin L, Oztop MH, 2017. Effect of different polysaccharides on swelling of composite whey protein hydrogels: a low field (lf) nmr relaxometry study. Journal of Food Process Engineering, 40(3), 1–9.

Oztop MH, McCarthy KL, McCarthy MJ, Rosenberg M, 2012. Uptake of divalent ions (Mn^{+2} and Ca^{+2}) by heat-set whey protein gels. Journal ofFood Science, 77(2), 68-73.

Ozturk B, McClements DJ, 2016. Progress in natural emulsifiers for utilization in food emulsions. Current Opinion in Food Science 7, 1-6.

Özcan T, Delikanlı B, 2011. Gıdaların tekstürel özelliklerinin geliştirilmesinde peynir altı suyu protein katkılarının fonksiyonel etkileri. U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi, Cilt 25, Sayı 2, 77-88.

Robins MM, Wilde PJ, 2003. Colloids and emulsions. Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition, 1517–1524.

Roldan-cruz C, Vernon-carter EJ, Alvarez-ramirez J, 2016. Assessing the stability of tween 80-based o / w emulsions with cyclic voltammetry and electrical impedance spectroscopy. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 511, 145–152.

Saberi AH, Fang Y, McClments DJ, 2013. Fabrication of vitamin E-enriched nanoemulsions: factors effecting particle size using spontaneous emulsification. J. Colloid Interface Sci. 391, 95-102.

Salehi F, 2020. Physico-chemical and rheological properties of fruit and vegetable juices as affected by high pressure homogenization: a review. International Journal of Food Properties, 23(1), 1136–1149.

Sarathchandraprakash NK, Mahendra C, Prashanth SJ, Manral K, Babu UV, Gowda DVS, 2013. Emulsions and emulsifiers. The Asian Journal of Experimental Chemistry, 8(1&2), 30-45.

Schmidt US, Schmidt K, Kurz T, Endreß HU, Schuchmann HP, 2015. Pectins of different origin and their performance in forming andstabilizing oili n-water-emulsions. Food Hydrocolloids, 46, 59–66.

Serdaroğlu M, Öztürk B, Kara, A, 2015. An Overview of Food Emulsions Description, Classification and Recent Potential Applications. Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 3(6), 430-8.

Shanura FIP, Daekyung K, Jae-Woon N, You-Jin J, 2019. Advances in functionalizing fucoidans and alginates (bio)polymers by structural modifications: a review. Chemical Engineering Journal, 355, 33–48.

Solans C, Izquierdo P, Nolla J, Azemar N, Garcia-Celma MJ, 2005. Nano-emulsions. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 10, 102-110.

Solans C, Morales D, Homs M, 2016. Spontaneous emulsification. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 22, 88-93.

Sun C, Gunasekaran S, Richards MP, 2007. Effect of xanthan gum on physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions. Food Hydrocolloids, 21(4), 555–564.

Taha A, Ahmed E, Ismaiel A, Ashokkumar M, Xu X, Pan S, Hu H, 2020. Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions. Trends in Food Science & Technology, 105, 363-77.

Tcholakova S, Denkov ND, Ivanov IB, Campbell B, 2006. Coalescence stability of emulsions containing globular milk proteins. Advances in Colloid and Interface Science, 126, 259–293.

Tekinşen OC, Tekinşen KK, 2008. Dondurma: temel bilgiler, teknoloji, kalite kontrolü. Konya, Selçuk Üniversitesi Basımevi.

Türker DA, Saraç MG, Doğan M, 2021. Yağ türünün bir fonksiyonu olarak lesitin adsorbe edilmiş yağ/su emülsiyonlarının ara yüzey reolojik özellikleri. Akademik Gıda 19(2), 159-168.

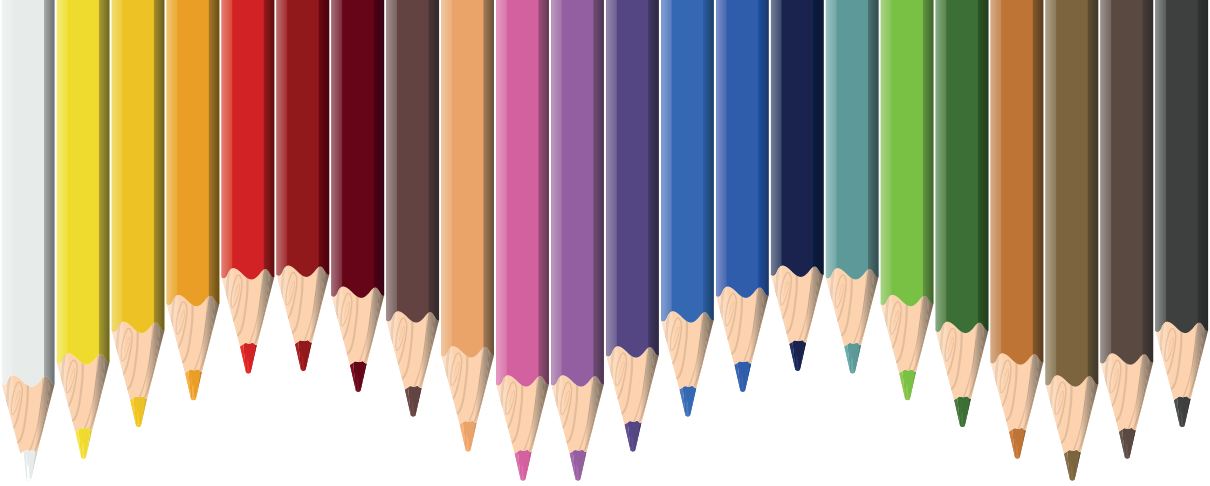
Wang Z, Wu J, Zhu L, Zhan X, 2017. Characterization of xanthan gum produced from glycerol by a mutant strain Xanthomonas campestris CCTCC M2015714. Carbohydrate Polymers, 157, 521–526.

Williams PA, Phillips GO, 2009. Gum arabic. Handbook of hydrocolloids. 2nd ed., 252–273.

Vázquez-Solorio SC, Vega-Méndez DD, Sosa-Herrera MG, Martínez-Padilla LP, 2011. Rheological properties of emulsions containing milk proteins mixed with xanthan gum. Procedia Food Science, 1, 335–339.

Yüksel F, 2013. Gıda teknolojisinde ultrases uygulamaları. Electronic Journal of Food Technologies, 8(2), 29-38

Zhang Z-H, Wang L-H, Zeng X-A, Han Z, Brennan CS, 2019. Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: a review. International Journal of Food Science & Technology, 54, 1, 1-13.



Bölüm 23

GIDA MUHAFAZADASINDA FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ VE ÖNEMİ

Tuğba Güngör Ertuğral[1]

1 Tuğba Güngör Ertuğral* (ORCID ID:0000-0002-1306-3399)
e mail: tugbagungor@comu.edu.tr Gıda Teknolojisi Bölümü, Çanakkale Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Çanakkale/TÜRKİYE

1. Termal Enerji Depolama Yöntemleri

Günümüzde petrol türevi yakıtlar, elektrik gibi enerji kaynaklarından tasarruf etmek amacıyla farklı enerji depolama teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Farklı endüstri dallarında ilgi odağı olan bu teknoloji gıda endüstrisinde ise gıda kalitesini sürdürmek ve güvence altına almak açısından son derece önemlidir. Gıda muhafazasında termal enerji depolama özelliğine sahip gıda ambalaj materyallerine olan ilgi ise her geçen gün artmaktadır.

Enerji depolama teknolojileri 4 ana başlık altında toplanabilir. Bunlar; mekanik, elektriksel, ısıl ve kimyasal enerji şeklindedir (Şekil 1). Termal enerji depolama ise genellikle 3 sınıf altında; duyulur ısı depolama, termokimyasal ısı depolama ve gizli ısı depolama olarak incelenmektedir (Dincer ve Dost, 1996).

Enerji Depolama Teknolojileri			
Mekanik Enerji	**Elektriksel Enerji**	**Isıl Enerji**	**Kimyasal Enerji**
-Pompaj Depolama	-Kapasitör	-Gizli Isı	-Piller
-Basınçlı Hava Sıkıştırma	-Süper Kapasitör	-Duyulur Isı	-Akış Bataryaları
-Volan	-Manyetik süper iletken		

Şekil 1. Enerji depolama teknolojileri (Evans vd., 2012; Mahlia, 2014)

1.1. Duyulur ısı

Duyulur ısı depolamada bir depolama ortamı ve giriş/ çıkış düzenekleri bulunur. Depolamada ortam sıcaklığı değiştirilerek enerji depolanır (Dincer, 2002). Örneğin, duyulur ısı depolama hal değişiminin olmadığı zamanda güneş enerjisini depolar ve sıcaklık artışı depo edilecek malzemede hissedilebilir veya ölçülebilirdir. Buna en iyi örneklerden biri ise kaya yataklarında ısının depolanmasıdır (Benli ve Durmuş, 2007).

1.2. Kimyasal enerji depolama

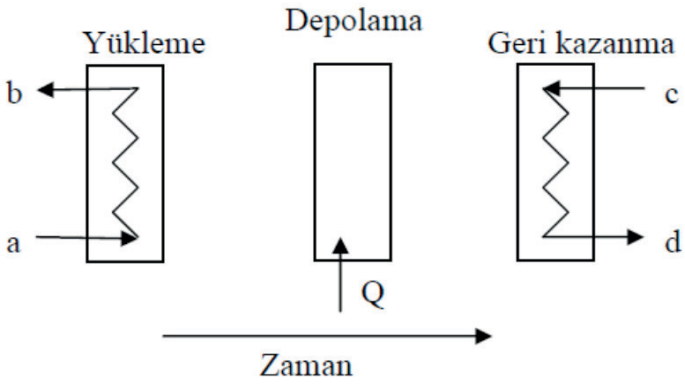
Kimyasal enerjiye dönüştürüldüğünde ısı enerjisi uzun süre depolanabilir. Bu sistemin esası ekzotermik olarak tepkimeye girebilen iki veya daha fazla kimyasal bileşikte tersinir tepkimeler boyunca kimyasal bağlarda ısının depolanmasıdır. Depolama sisteminin ömrü ise teorikte sınırsızdır (Başçetinçelik, 1997; Gök, 2005).

1.3. Gizli Isı

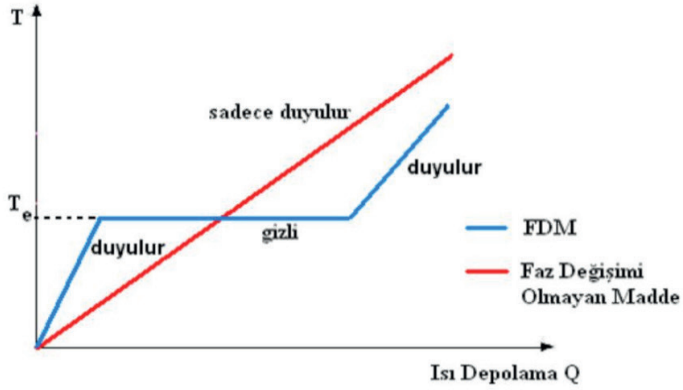
Gizli ısı depolama, bir faz değişim malzemesinin birim ağırlığı başına ısı enerjisi (Q) depolanması ve bu enerjinin serbest bırakılması yöntemidir

(Abhat, 1983) (Şekil 2). Gizli ısı depolama, enerjinin sabit faz geçiş sıcaklığında faz değişimi ile madde içerisinde depolanmasıdır (Kılıç ve Öztürk, 1983; Sharma ve Sagara, 2005) (Şekil 3).

Gizli ısı depolama, duyulur ısı depolama yöntemine göre daha yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahip olmakla birlikte enerji depolama ve geri kazanım sabit sıcaklıkta meydana gelmektedir. Ayrıca ısıtma ya da soğutma amaçlı kullanılabilir (Sharma ve Sagara, 2005).



Şekil 2. Termal enerji depolama sistemlerinin genel bileşenleri (Acar, 2014).



Şekil 3. Duyulur ve gizli ısı depolama işleminin sıcaklık-ısı grafiği (Sarı vd.,2005).

2. **Gıda muhafazasında faz değişim materyallerinin önemi**

Gıda muhafazasında mikrobiyal, enzimatik, fiziksel ve kimyasal bozulmaları ve önlemeye veya yavaşlatmaya yardımcı olan en etkili ve sağlıklı uygulama düşük sıcaklı uygulamalarıdır. Bununla birlikte soğukta depolama/

dağıtım aşamalarında soğuk zincirde sıcaklık dalgalanmaları meydana gelebilir. Bu durum mikroorganizma artışı ile gıdayı olumsuz etkileyebilmektedir (Sun vd., 2018). Daha da önemlisi bu durum raf ömrünün azalması ile sonuçlanabilir. Gıda ambalajlarının ısı yalıtımının sınırlı olması ve zayıf termal tamponlama nedeni ile soğuk zincir sürdürülemeyebilir. FDM'lerin imalat yöntemleri ve farklı alanlardaki uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar da son 10 yılda artış göstermiştir (Gulfam vd.,2020).

Tablo 1. Üretimden Tüketim Noktasına Meyve ve Sebzelerin Küresel Ortalama Kayıpları (Gustavsson vd.,2011).

Üretim(Tarımsal)	Taşıma ve Depolama (Hasat Sonrası)	Ürün İşleme ve Ambalajlama	Sevkiyat	Tüketim
%10-20	%4-10	%2-25	%8-17	%5-28

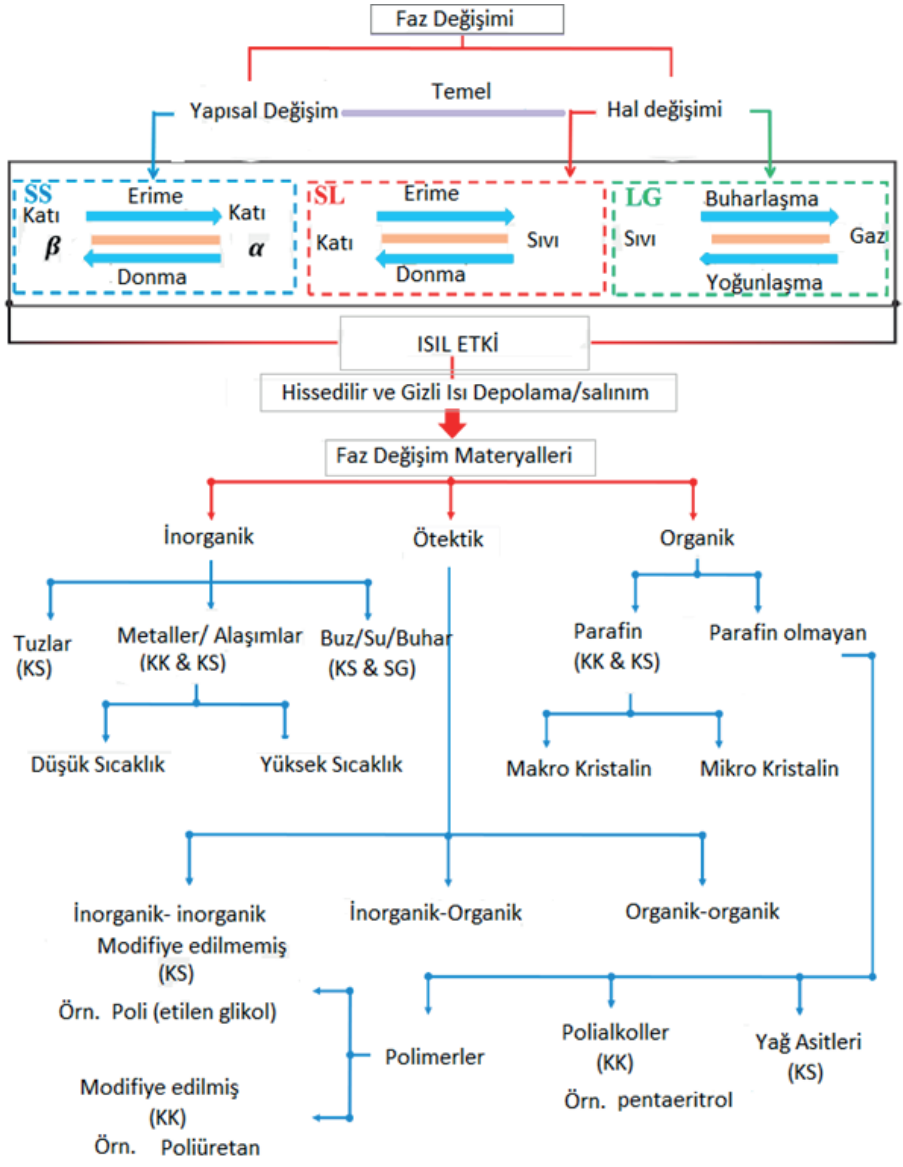
Gıda ambalajları muhafaza sıcaklığını istenilen sınırlar içinde tutacak ve böylece ürünlerin kalitesini ve raf ömrünün artırılmasında etkin rol oynayacak şekilde tasarlanabilir. (James vd. 2006). Bu özellik ile sadece gıda değil ilaç, kozmetik alanlarında da soğuk zincir korunabilir (Oró vd., 2012). Yani gıda ambalaj materyallerine ısı depolama özelliği kazandırmak mümkündür (Gin ve Farid, 2010 , Oró. vd., 2012).

Maliyet açısından fazla ekonomik olmayan günümüz soğutma sistemlerine baktığımızda örneğin buhar sıkıştırmalı soğutma sistemlerinin 1kWh soğuk etkisi üretmesi amacıyla 0,585 kg karbondioksit (CO_2) salınımı yaptığı belirlenmiştir. 1kWh soğutma etkisi için maliyetin, enjektörlü bir sistemde yaklaşık 0,016 Euro/kWh ve geleneksel soğutma sisteminde ise 0,178 Euro/kWh olduğu belirlenmiştir (Üçgül, 2009). Enerji masraflarının gıda işletmeleri için önemi ise gıda fiyatlarına yansıma ve ekonomik anlamda olumsuzlukların meydana gelmesidir.

3. **Faz değişim materyalleri uygulama alanları**

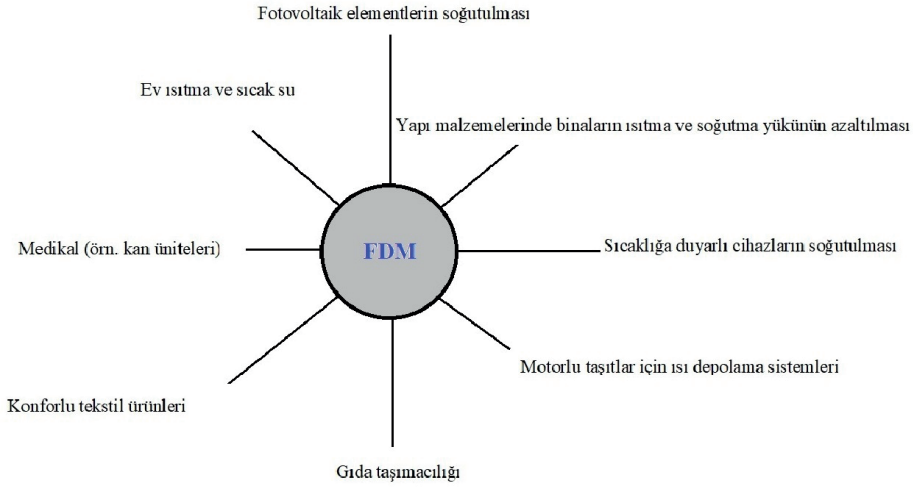
Genel olarak faz değişimi sırasında malzeme tarafından emilen gizli ısıyı depolayan ve bu amaçla kullanılan malzemelere faz değişim malzemesi (FDM) denilmektedir. FDM'lerin depolama hacmi küçüktür ve birim kütle başına faz değişimi ile emilen veya salınan ısıl enerji, sıcaklık artışıyla depolanan enerjiden çok daha fazladır. FDM'ler katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz faz değişimi gerçekleştirebilir ve ayrıca katı-sıvı faz değişiminde, katı haldeyken FDM tarafından depolanan ısı enerjisi sıvı hale geçişte serbest bırakılabilme özelliğindedir (Alkan vd., 2006). Bu alanda en fazla yararlanılan FDM'ler; parafin mumları, yağ asitleri, ötektikler ve tuz hidratlarıdır (Farid vd., 2004; Gulfam vd.,2019) (Şekil 4). Parafin bileşikleri, güvenilir, öngörülebilir, toksik olmayan, kimyasal olarak inert ve 500 °C'nin altında kararlı maddelerdir (Sharma vd., 2009). FDM'lerin zayıf ısıl stabiliteleri ve iletkenlikleri ile or-

tam sıcaklığında sıvı olması gibi sebepler ambalaj materyallerine eklenmesini zorlaştırır (Fang vd., 2009). Bu nedenle genelde FDM bir kabuk malzemesi içine hapsedilerek kapsüllenmektedir.



Şekil 4. FDM'lerin faz değişimine bağlı sınıflandırılması (Gulfam vd.,2019).

Günümüz endüstrisinde FDM'ler farklı kullanım alanlarına sahiptir (Şekil 5). Farklı tiplerde olan FDM'lerin termal enerji depolama uygulama alanları da değişmektedir (Konuklu, 2008).



Şekil 5. Farklı tiplerde olan FDM'lerin termal enerji depolama uygulamaları kullanılma alanları (Konuklu, 2008).

FDM'ler enerji üretmek için kaynak eksikliği olduğunda ya da sadece 4-5 saat aralıklarla açılan soğutma sistemleri ile verimli bir şekilde kullanılabildiği literatür çalışmalarında gözlemlenmiştir. Bu çalışmalardan biri de kompresör verimi üzerine buzdolabı tipi soğutuculardaki yapılan bir araştırmada kompresör açma/kapama döngülerinin sayısını azaltması çalışmasıdır ve FDM kullanılmıştır. Araştırmada sayısal modelleme ve deneysel doğrulama, farklı ortam koşullarında FDM şarj ve deşarj oranını ve karşılık gelen buzdolabının açık ve kapalı döngü sürelerini tahmin etmek için bir FDM içeren bir prototip termal depolama buzdolabı tasarlanmıştır ve 5 mm'lik bir FDM levhasının buzdolabına entegrasyonu ile güç kaynağı olmadan 3-5 saat sürekli çalışabilmiştir (Marques vd.2014) ve bu çalışmada elektrik enerjisi tüketimi çok azdır. 5 mm kalınlığında FDM esaslı bir levha, elektrik güç kaynağı olmadan termal yüke bağlı olarak 4 ila 8 saat arasında depo ısısı muhafaza edebilir (Maiorino vd.2019). FDM esaslı bir depo yine 36 saat boyunca -18°C ve -16°C'de depolama gerçekleştirildiğinde sistem ısıl yükünde kayda değer azalma sağlanabilir. 30 saat sonunda ise kompresör, -18 °C set sıcaklığında, % 19.44 ve -16 °C'de ise % 28.13 daha az çalışır ve günde -18°C'de 2 saat, -16°C'de 3 saat 20 dakika daha az enerji tüketilebilir (Kılıç, 2018). Rubitherm

(R) maddesi ise faz değişim materyali olarak üretilmektedir ve özelliklerine göre farklı sayılarla kodlanmıştır (RT3, RT4 ve RT5). Rubitherm esaslı kompozit gıda rafları 3-5 °C'de 180-190 kJ/kg gizli ısı depolama kapasitesine sahip olabilmekte ve tasarlanması durumunda gıda muhafazasını hedeflendiği görülmektedir (Wu vd., 2017).

Uygun sıcaklık aralıklarının belirlenmesi ise ötektik karışımlar ile sağlanabilmekte, örneğin C12-C14 (dodekane-tetradekan) ve C13-C15 (tridekan-pentadekan) ötektik karışımları ile (-12)-(4) ^{0}C ve (-5)-(10) ^{0}C sıcaklık aralıklarında FDM materyallerinin üretilmesi sözkonusu olabilmektedir (Shen vd., 2019). Yine soğuk muhafaza amaçlı n-tetradekan/PS mikrokapsül üretimi ile (–3)-(4) ^{0}C arasında faz değişimi sağlanabilmektedir (Fang vd., 2013).

Soğuk muhafazada kullanılmak üzere hazırlanmış yeni tip malzemeler yine depo ortamlarına uygulanabilir. Örneğin, n-dodekan, n-tridekan ve n-tetradekan içeren polistiren/polimetilmetakrilat (PS-PMMA) mikrokapsül çalışmasında (-4) ile 8°C arası değişen sıcaklık aralıklarında ısı depolama kabiliyeti ölçülmüştür (Zhao vd.,2020). Son yıllarda ise cherry domateslerin soğuk muhafazası amacıyla polipropilen/oktadekan kompozit filmleri yüksek sıcaklık aralıklarında gizli ısı depolayabilmiştir (Kim vd., 2016). Yine C12-C14 (dodekane-tetradekan) ve C13-C15 (tridekan-pentadekan) ötektik karışımları gizli ısı depolama özelikleri üzerine bir çalışma yapılmış materyallerin gizli ısı depolama sıcaklık aralıkları (-12)-(+4) ^{0}C ve (-5)-(10) ^{0}C olarak belirlenmiştir (Shen, 2019).

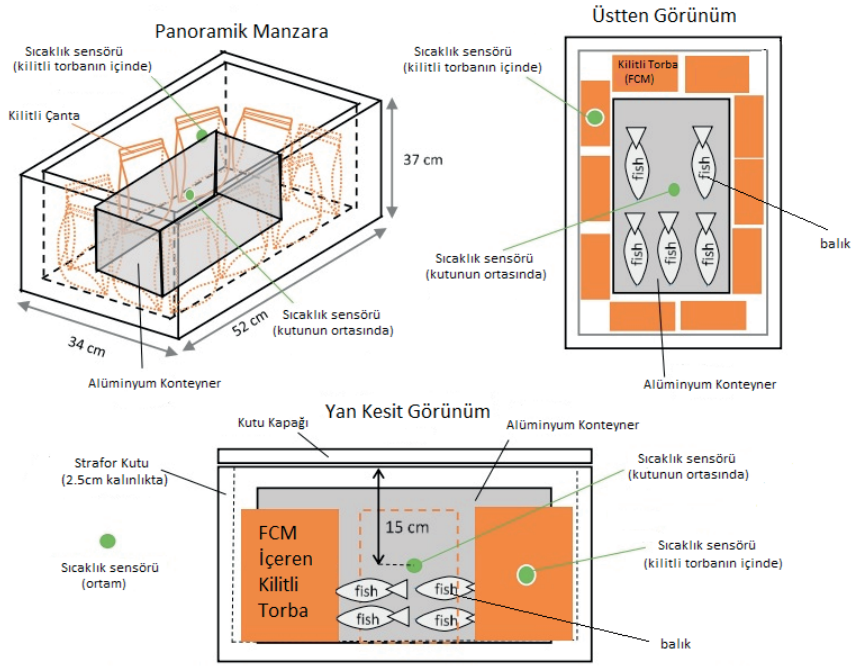
Mikrokapsülleme ile üretilen FDMler, doğal veya sentetik polimerik kapsüllerde kapsüllenmiş bir materyallerdir (Sukhorukov vd., 2005). FDM kullanımında mikroenkapsülasyon konusunda özellikle elektrohidrodinamik işlemlerin yer aldığı görülmektedir. Elektroeğirme ve elektrospreylemeyi içerisine alan teknikte, biyomedikal maddeler, fonksiyonel gıda bileşenleri, FDM'ler ve polimer matrisler içindeki diğer maddeler dahil olmak üzere çeşitli bileşenlerin kapsüllenmesinde uygun bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır (Goldberg vd., 2007; Perez-Masia vd., 2013). Elektroeğirme, polimerik bir çözeltiye yüksek voltajlı bir elektrik alanı uygulanarak birkaç on ila birkaç yüz nanometre çapında uzun dokunmamış ultra ince liflerin oluşturulabildiği bir tekniktir (Teo ve Ramakrishna, 2006).

- FDM mikrokapsüllenmesindeki sebep faz değişim maddesinin kapsül içerisinde olması ve faz değişimini burada gerçekleştirmesidir. Mikrokapsül polimerik yapıda bir duvar ve bu duvar tarafından etrafı kaplanmış sıvı maddeden meydana gelir. Kapsül duvarı FDM'ye karşı inerttir. Kullanılan materyal ve yönteme göre, kapsül boyutu 1 nm'den 1000 μm'ye kadar değişebilir (Övez ve Yüksel, 1992). FDM kullanımında diğer bir yöntem ise FDM özellikli malzeme sentezidir. Poli (etilen glikol) esaslı malzemeler gizli ısı

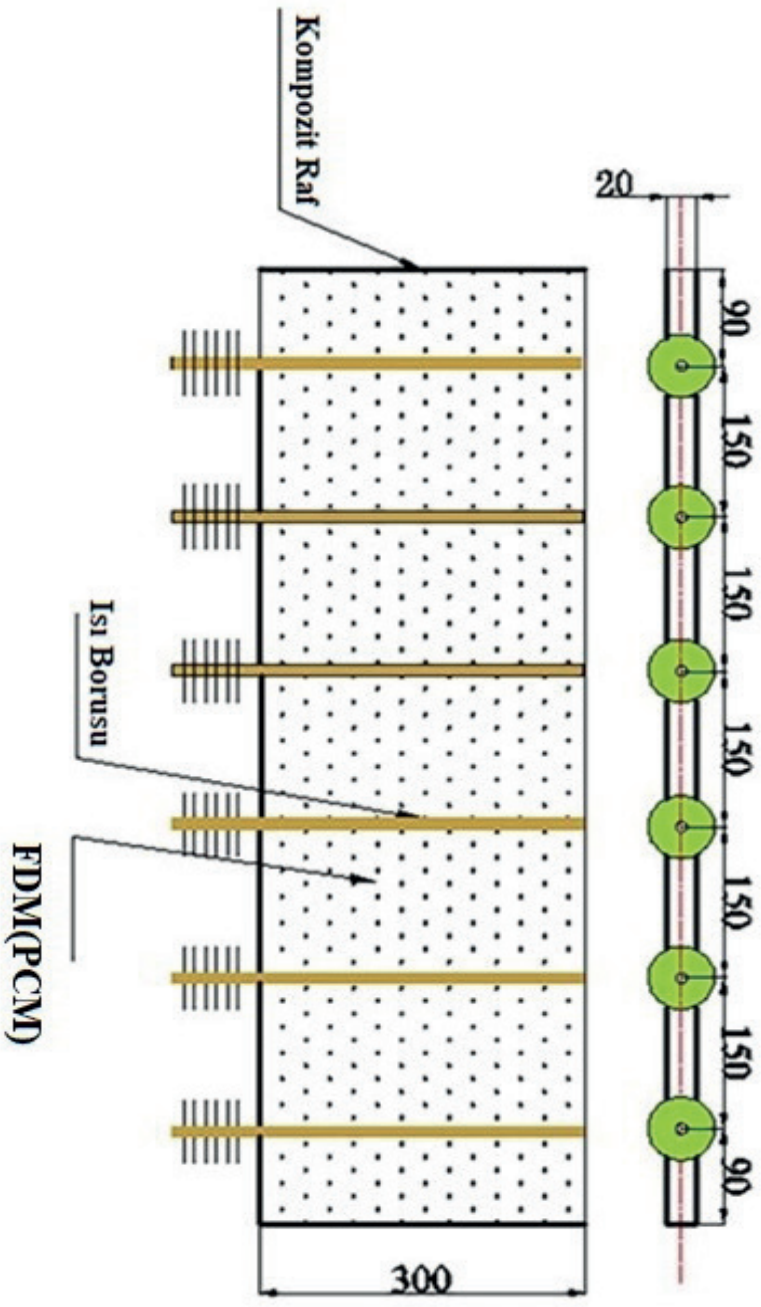
enerjisi depolama amaçlı sentezlenebilmektedir (Güngör Ertuğral ve Alkan, 2021). Yine aynı şekilde poli(etilen glikol)/akrilik polimer karışımları gizli ısı depolama amaçlı hazırlanabilmektedir (Alkan vd., 2006).

- Artan dünya nüfusu sebebi ile ekonomik açıdan fayda sağlayabilecek yeni, alternatif muhafaza metodlarına duyulan ihtiyaç ise artmaktadır. Küresel anlama bazı gıda maddeleri, özellikle de meyve ve sebzeler depolama ya da nakliye sırasında ciddi kayıplara uğrayabilirler (Gustavsson vd.,2011). Organik ve inorganik FDM'ler, birçok araştırmacı tarafından mevcut maksimum termal verimliliği ortaya çıkarmak için denenmiştir (Sathishkumar vd., 2020).

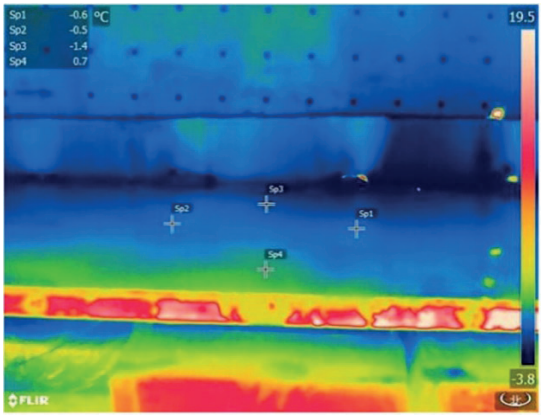
Çabuk bozulan gıdaların nakliyesi ve geçici olarak depolanması sırasında karton ambalajlar için etkili termal tamponlamaya yönelik nano yapılı kalsiyum silikatlar geliştirilmiştir (Johnston vd., 2008). RT4 kodlu rubitherm ile ısıl iletkenliğini arttırmak amacıyla, farklı miktarlarda karbon nanotüp (CNT) eklenen kompozit rafın yapısal diyagramı Şekil 7'de görülmektedir ve %3-CNT eklenmiş rafların sıcaklık dağılımı kızılötesi termal görüntüleme cihazı ile görüntülenebilmiştir (Şekil 8) (Wu vd.2019). Enerji tasarrufu konusunda 6^0C'de gizli ısı depolayan bir FDM yıllık enerji tüketimde %16.09 enerji tasarrufu sağlayabilir (Sarafoji vd., 2021). Su ürünleri alanında ise yine FDM çalışmaları başarılı sonuçlar ortaya çıkarabilir. Örneğin balıkların soğuk depolanması için FDM olarak ötektik potasyum klorür (KCl) çözeltisi kullanıldığında FDM destekli kutusundaki balıkların, buz küpleri kullanılarak saklanan balıklardan biraz daha taze olduğu belirlenmiştir (Şekil 6) (Sukoco vd.,2021) (Şekil 6). Ayrıca n-tridekan / n-tetradekan ötektik karışımının poli(metil metakrilat) kabuk ile mikrokapsülasyonu ile 0-2°C arasında depolanabilen gıda maddeleri için yeni tip FDM olarak üretilmiştir (Güngör Ertuğral vd., 2022).



Şekil 6. Kilitli torbaların içinde ötektik KCI çözeltisi içeren balık saklama kutusunun çizimi (Sukoco vd., 2021).

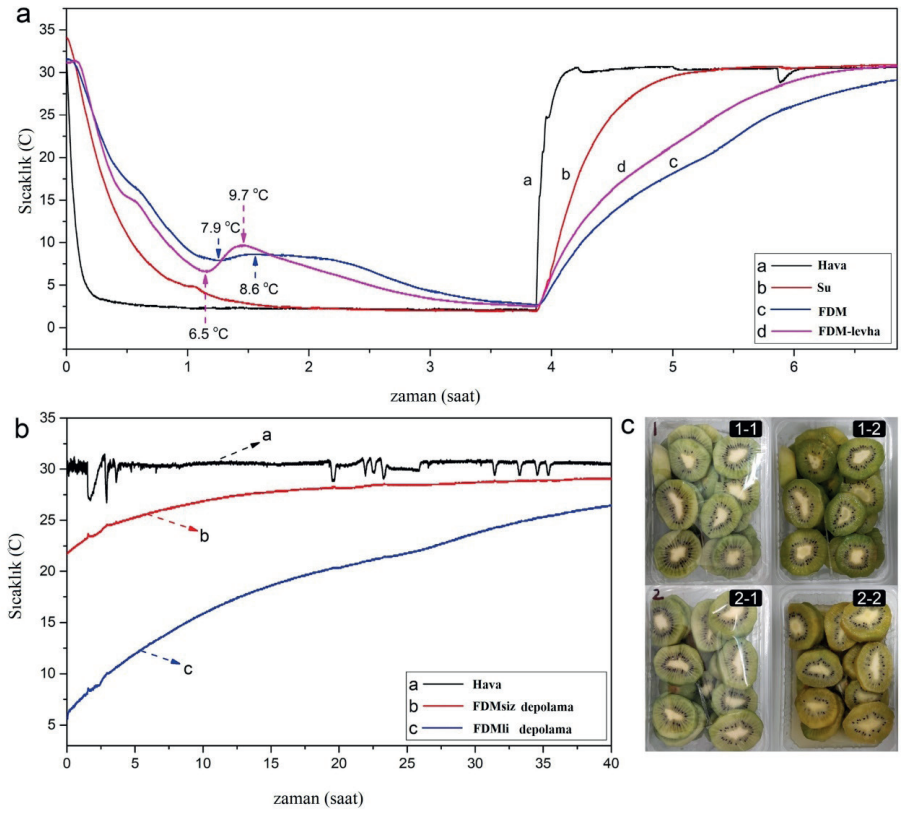


Şekil 7. Bir kompozit rafın yapısal diyagramı (Wu vd., 2019).



Şekil 8. Kızılötesi termal görüntüleme cihazı ile bir %3-CNT'nin kompozit rafındaki sıcaklık dağılımı (Wu vd.2019).

FDM'ler soğuk enerji depolama teknolojisi ile, geleneksel soğutmalı taşıma moduyla karşılaştırıldığında karbon emisyonlarını etkili bir şekilde azaltabilir ve bu nedenle giderek daha fazla ilgi görmektedir. Soğuk enerji taşıyıcısı olarak sodyum karbonat dekahidrat (SCD) kullanılarak ve katkı maddeleri ile performansı arttırılması esasına dayalı taze meyvelerin 5 °C soğutularak taşınmasına yönelik SCD kompozit FDM 9,3 °C erime sıcaklığında 90,7 J/g gizli ısı (erime gizli ısısı) enerjisi depolayabilmektedir (Peng vd., 2023) (Şekil 9).



Şekil 9. Uygulama deneyi (a) Soğuk depolama plakalarının sıcaklık eğrileri; (b) Isı yalıtım kutularının ortasının sıcaklık eğrileri; (c) Kivi meyvesinin depolamadan önce ve sonra karşılaştırılması (Peng vd., 2023).

Gelecekte petrol türevi yakıt tüketiminin durdurulması adına FDM'ler önemli rol oynayabilir. Günümüzde gıda ve ilaç sektöründe nakliye sırasında sıcaklık dalgalanmalarını önleyebilmek adına ve soğuk hava depolarındaki enerji tüketimini en aza indirerek enerji tasarrufunun sağlanması için FDM'lerin sentezi ve üretimi oldukça önemlidir. Yenilenebilir enerji sistemleriyle (rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi vb.) birlikte kullanıldığında FDM'ler yakıt ve elektrik tüketimini durdurarak sera gazı salınımı azaltabileceği gibi, gıda maliyetini de düşürerek insanların gıda maddelerine ekonomik ve sağlıklı bir şekilde ulaşmasına yardımcı olabilir.

KAYNAKLAR

Dincer, I., & Dost, S. (1996). A modelling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid objects. International Journal of Energy Research, 20(6), 531-539.

Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. (2012). Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration. Renewable and sustainable energy reviews, 16(6), 4141-4147.

Mahlia, T. M. I., Saktisahdan, T. J., Jannifar, A., Hasan, M. H., & Matseelar, H. S. C. (2014). A review of available methods and development on energy storage; technology update. Renewable and sustainable energy reviews, 33, 532-545.

Dincer, I. (2002). The role of exergy in energy policy making. Energy policy, 30(2), 137-149.

Benli, H., & Durmuş, A. (2007). Havalı Güneş Kolektörleri ve Gizli Isı Depolama Yöntemi Kullanılarak Sera Isıtılması. Mühendis ve Makina, 48(569), 16-26.

Başçetinçelik, A., Öztürk, H. A. S. A. N., & Paksoy, H. A. L. İ. M. E. (1997). Greenhouse heating with solar energy and phase change energy storage. Acta Horticulture, 443.

Özgül, G. Ö. K. Increasıng energy efficiency in dishwashers by using thermal energy storage in phase change materials.

Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. Solar energy, 30(4), 313-332.

Kılıç, A., & Öztürk, A. (1983). Güneş enerjisi. Kipaş Dağıtımcılık.

Sharma, S. D., & Sagara, K. (2005). Latent heat storage materials and systems: a review. International journal of green energy, 2(1), 1-56.

Acar S.Ş. Faz değiştirici maddeler ve uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Nisan 2014.

Sarı, A., Tarhan S., Kaygusuz, K., 2005. Enerjiyi düşük sıcaklıkta gizli ısı olarak depolayan kimyasal maddeler. Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları sempozyumu. Kayseri.

Sun, XH, Xiao, L., Lan, WQ, Liu, SC, Wang, Q., Yang, XH, ... ve Xie, J. (2018). Sıcaklık dalgalanmasının buz depolamalı büyük sarı şakrakçının (Pseudosciaena crocea) lojistik süreci boyunca kalite değişimleri üzerine etkileri. Gıda İşleme ve Muhafaza Dergisi , 42 (2), e13505.

Gulfam, R., Orejon, D., Choi, C. H., & Zhang, P. (2020). Phase-change slippery liquid-infused porous surfaces with thermo-responsive wetting and shedding states. ACS applied materials & interfaces, 12(30), 34306-34316.

James, J. (2006). Overview of microbial hazards in fresh fruit and vegetables operations. Microbial hazard identification in fresh fruit and vegetables, 1-36.

Oró, E., De Gracia, A., Castell, A., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). Review on

phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. Applied Energy, 99, 513-533.

Gin, B., & Farid, M. M. (2010). The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food. Journal of Food Engineering, 100(2), 372-376.

Üçgül, İ. (2009). Thermodynamic, environmental and economic analyses of solar ejector refrigeration system application for cold storage.

Alkan, C. (2006). Enthalpy of melting and solidification of sulfonated paraffins as phase change materials for thermal energy storage. Thermochimica acta, 451(1-2), 126-130.

Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy conversion and management, 45(9-10), 1597-1615.

Gulfam, R., Zhang, P., & Meng, Z. (2019). Advanced thermal systems driven by paraffin-based phase change materials–A review. Applied Energy, 238, 582-611.

Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). Global food losses and food waste.

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable energy reviews, 13(2), 318-345.

Fang, G., Li, H., Yang, F., Liu, X., & Wu, S. (2009). Preparation and characterization of nano-encapsulated n-tetradecane as phase change material for thermal energy storage. Chemical engineering journal, 153(1-3), 217-221.

Konuklu, Y. (2008). Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama ile binalarda enerji tasarrufu. DoktoraTezi, Çukurova Üniversitesi.

Marques, A. C., Davies, G. F., Maidment, G. G., Evans, J. A., & Wood, I. D. (2014). Novel design and performance enhancement of domestic refrigerators with thermal storage. Applied Thermal Engineering, 63(2), 511-519.enic thermal energy storage. Fluid Phase Equilibria, 493, 109-119.

Maiorino, A., Del Duca, M. G., Mota-Babiloni, A., Greco, A., & Aprea, C. (2019). The thermal performances of a refrigerator incorporating a phase change material. International Journal of Refrigeration, 100, 255-264.

Kılıç, G. A., Yalçın, E., & Aydın, A. A. (2018). Efficıency analysıs of pcm added cold store.

Wu, X., Li, W., Wang, Y., Chang, Z., Wang, C., & Ding, C. (2017). Experimental investigation of the performance of cool storage shelf for vertical open refrigerated display cabinet. International Journal of Heat and Mass Transfer, 110, 789-795.

Shen, T., Li, S., Peng, H., & Ling, X. (2019). Experimental study and thermodynamic modeling of solid-liquid equilibrium of binary systems: Dodecane-tetradedcane and tridecane-pentadecane for cryogenic thermal energy storage. Fluid Phase Equilibria, 493, 109-119.

Fang, Y., Li, H., & Li, X. (2013). Lifetime enhancement techniques for PCM-based image buffer in multimedia applications. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 22(6), 1450-1455.

Zhao, S., Lin, Q., Ran, J., Musa, S. S., Yang, G., Wang, W., ... & Wang, M. H. (2020). Preliminary estimation of the basic reproduction number of novel coronavirus (2019-nCoV) in China, from 2019 to 2020: A data-driven analysis in the early phase of the outbreak. International journal of infectious diseases, 92, 214-217.

Kim, D., Lim, M., & Seo, J. (2016). Preparation of polypropylene/octadecane composite films and their use in the packaging of cherry tomatoes. Journal of Applied Polymer Science, 133(41).

Sukhorukov, G., Fery, A., & Möhwald, H. (2005). Intelligent micro-and nanocapsules. Progress in Polymer Science, 30(8-9), 885-897.

Goldberg, M., Langer, R., & Jia, X. (2007). Nanostructured materials for applications in drug delivery and tissue engineering. Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition, 18(3), 241-268.;

Pérez-Masiá, R., López-Rubio, A., & Lagarón, J. M. (2013). Development of zein-based heat-management structures for smart food packaging. Food Hydrocolloids, 30(1), 182-191.

Teo, W. E., & Ramakrishna, S. (2006). A review on electrospinning design and nanofibre assemblies. Nanotechnology, 17(14), R89.

Övez, B., & Yüksel, M. (2002). Parfümlerin çapraz bağlı mikrokapsüllerden yavaş salgılanmaları. Ekoloji Çevre Dergisi, 11(43), 26-29.

Güngör Ertuğral, T., & Alkan, C. (2021). Synthesis of thermally protective PET–PEG multiblock copolymers as food packaging materials. Polymers and Polymer Composites, 29(9_suppl), S1125-S1133.

Alkan, C., Sari, A., & Uzun, O. (2006). Poly (ethylene glycol)/acrylic polymer blends for latent heat thermal energy storage. AIChE journal, 52(9), 3310-3314.

Sathishkumar, N., Kumar, V. A., Gokulnath, M., & Raj, G. K. (2020). Performance analysis of palmitic acid coated PCM storage container. Int. J. Res. Rev, 7(3).

Johnston, J. H., Grindrod, J. E., Dodds, M., & Schimitschek, K. (2008). Composite nano-structured calcium silicate phase change materials for thermal buffering in food packaging. Current Applied Physics, 8(3-4), 508-511.

Wu, X., Wang, C., Wang, Y., & Zhu, Y. (2019). Experimental study of thermo-physical properties and application of paraffin-carbon nanotubes composite phase change materials. International Journal of Heat and Mass Transfer, 140, 671-677.

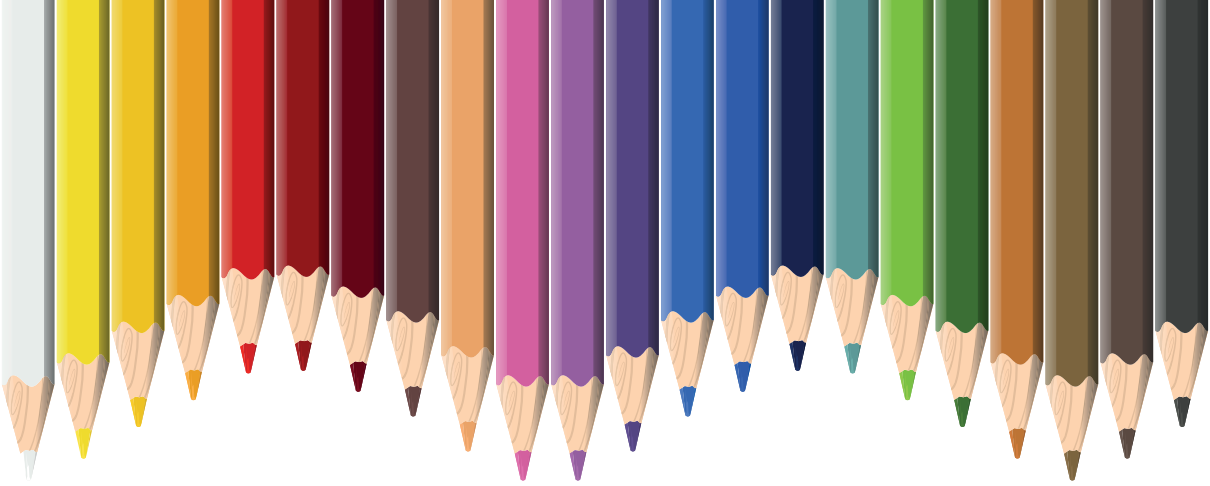
Sarafoji, P., Mariappan, V., Anish, R., Karthikeyan, K., & Reddy, J. (2021). Performance study of solar photovoltaic cold storage system using phase change materials. Materials Today: Proceedings, 46, 9623-962.

Sukoco, R. K., Indartono, Y. S., & Mujahidin, D. (2021, March). Eutectic potassium chloride (KCl) solution as phase change material (PCM) for fish cold storage.

In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1109, No. 1, p. 012062). IOP Publishing.

Güngör Ertuğral, T., Danışman, M., & Oral, A. (2023). Microencapsulation of n-tridecane/n-tetradecane eutectic mixture with poly (methyl methacrylate) shell for candidate for food packaging thermal energy storage material. Polymer-Plastics Technology and Materials, 62(5), 554-562.

C., Peng, M., Xie, B., Li, Y., & Li, M. (2023). Novel phase change cold energy storage materials for refrigerated transportation of fruits. Renewable Energy, 119583.



Bölüm 24

DOĞAL ANTİMİKROBİYAL BİR METABOLİT: PROPOLİS

Sabire YERLİKAYA[1]
Cemalettin SARIÇOBAN[2]

1 Doç. Dr., Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Karaman, ORCID: 0000-0001-9842-5848
2 Prof. Dr., Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Konya, ORCID: 0000-0001-9898-0884

Giriş

Gıda piyasasının küreselleşmesi, yeni gıdalara olan talebe karşılık fonksiyonel gıdaların üretimi, yeni üretim teknikleri ve tüketicilerin minimum işlenmiş hazır gıdalara olan taleplerinin artması sebebiyle mikrobiyolojik bulaşma riskini azaltabilecek yeni muhafaza yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde kaliteli, besleyicilik değeri yüksek, doğal ve az işlenmiş hazır gıdalara olan tüketici talepleri arttığından geleneksel muhafaza teknikleri olan yüksek ısıl işlem, tuzlama, asidifikasyon, kurutma, kimyasal koruyucu gibi uygulamaların yerine yeni alternatif muhafaza tekniklerine eğilim vardır (Khalil, 1999).

Gıdalar, içerdikleri besin elemanları/ögeleri açısından mikroorganizmalar için uygun gelişim ortamlarıdır. Gıdalar içerisinde et ve süt ürünleri kolay bozulan gıdalar olup mikrobiyal faaliyet açısından riskli gıdalar grubunda yer almaktadır. Et endüstrisinde meydana gelen teknolojik gelişmeler, gıda güvenliğini sağlayacak prosedürlerin ve HACCP gibi etkin bir işlemin uygulanmasına rağmen, istenmeyen mikroorganizmalar (patojen ve zararlılar) et ve et ürünleri için hala risk faktörü olabilmektedir.

Gıdaların muhafazasında tüketici sağlığının korunması ve girişimin ekonomik olarak sürdürülmesinde gıdanın raf ömrü süresince ürünün güvenliğinin korunması ve depolama stabilitesinin arttırılması hedeflenmektedir. Et ve et ürünleri, biyolojik kompozisyonları nedeniyle diğer birçok gıdadan daha kolay bozulma eğilimindeki gıda grubudur. Et ve et ürünlerinin muhafazası, fiziksel, kimyasal, duyusal ve mikrobiyolojik değişikliklere karşı yapılan sürekli bir mücadeledir (Devlieghere ve ark., 2004). Etin tazeliği ve raf ömrü; sıcaklık, oksijen, endojen enzimler, su aktivitesi, ışık ve başlangıçtaki mikroorganizma yükü gibi pek çok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörlere bağlı olarak et rengi ve lezzetinde istenmeyen değişiklikler ortaya çıkmaktadır (Faustman ve Cassens, 1990). Zengin besin maddesi içeriğine sahip olan et ve et ürünleri gıda kaynaklı patojenler ve bozulma etmeni mikroorganizmaların çoğalması için mükemmel bir ortam oluşturmaktadır. Bu nedenle ürün güvenliği ve kalitesinin sağlanması için etkili koruma teknolojilerinin uygulanması gerekmektedir (Aymerich ve ark., 2008).

Bireylerin fiziksel ve zihinsel faaliyetlerini devam ettirebilmeleri ancak sağlıklı ve düzenli beslenme ile mümkün olabilmektedir. Et ve et ürünleri insanların çok uzun yıllardan bu yana severek ve isteyerek tükettiği bir gıda maddesidir. Tüketicilerin beslenme alışkanlıklarının değişmesi ve et ürünlerine olan talebin artması; bu ürünlerin üretimini zorunlu hale getirmiştir. Bunun yanında çok çeşitli araştırmaların yapılmasına da zemin hazırlamıştır (Çakır, 2013).

Propolis

Propolis eski Yunanca'da 'Pro'; ön giriş ve 'polis' şehir anlamında kullanılmaktadır. Bal arılarının kovanı savunmalarıyla ilgili olduğu belirtilmiştir (Ghisalberti, 1979). İbranice eski yazıtlarda 'Trozi' olarak geçer ve tedavi edici özellikleri belirtilmiştir. 12. yüzyılda Avrupa'da olan kayıtlarda propolisin tıbbi olarak kullanımından bahsedilmektedir. Medikal preperatlarının ağız ve yara enfeksiyonlarının tedavisi ve diş sağlığı için kullanımından söz edilmiştir. Son zamanlarda araştırıcıların dikkatini daha çok çekmeye başlayan propolisin keşfedilen faydaları henüz çok az aydınlatılabilmiştir (Ghisalberti, 1979; Durán ve ark., 2007). Şekil 1'de arı kovanlarından toplanarak topak haline getirilmiş propolis örneği görülmektedir.



Şekil 1. *Kovandan toplanarak topak haline getirilmiş propolis*

Propolis, çam, meşe, huş, okaliptüs, kavak, kestane gibi ağaçlar ve bazı otsu bitkilerin tomurcuk, yaprak ve benzeri kısımlarından arılar tarafından toplanır. Mumla karıştırılarak kovan içerisinde birçok amaca yönelik olarak kullanılan zamk gibi yapışkan, reçineye benzer bir kokuya sahip olan ve rengi koyu sarıdan kahverengiye kadar değişen bir maddedir.

Kovandan elde edilen propolis içinde toz, toprak, arıların kopan bacakları, arıların öldürdükleri diğer hayvanların parçaları bulunabilir. Bu nedenle propolis kovandan alındığı gibi tüketilmez. Bir takım ön işlemler ile saflaştırılır. Propolisin birçok olumlu özelliğinin araştırmalarda ortaya konulmasından önce arıcının çalışma koşullarını ve bal hasadını zorlaştırması ve petekli balın pazar değerini düşürmesi gibi sebeplerden dolayı, kolonilerin propolis toplama eğiliminin yüksek olması istenmeyen bir özelliktir. Ancak, günümüzde propolis dünya ticaretinde ve marketlerde düzenli olarak alınıp satılan bir ürün haline gelmiştir. Fiyatı ülkelere göre değişmektedir. ABD ve Kanada'da daha ucuz (2-6 Dolar/Pound) iken, propolisin daha yaygın olarak kullanıldığı Yeni Zelanda'da fiyatı yaklaşık 26 Dolar/Pound'dur.

Başlıca üretici ülkeler, başta Çin olmak üzere Arjantin, Uruguay, Şili, Brezilya, Kanada ve bazı Doğu Avrupa ülkeleridir. Japonya; Brezilya ve Çin'den fazla miktarda propolis ithal etmektedir. Propolis talebi Tayland'da Japonya kadar fazla değildir. Ancak günden güne tüketimi artmaktadır. Propolis üretimi konusunda en ileri ülke Brezilya'dır. Bu ülkede arılara propolis üretimi için özel kovanlar oluşturulmuştur. Brezilya'da üretilen tonlarca propolis, kargo uçaklarla Japonya'ya ihraç edilerek işlenmeleri Japonya'da yapılmaktadır. Günümüzde bu değerli arı ürünü antibakteriyal, antifungal, antiviral özellikleri yanında antiinflamatuvar, antiülser, lokal anestetik, antitümör, bağışıklığı uyarıcı çok sayıda yararlı biyolojik aktivite göstermekte olup, son üç bin yıldır doğal ilaç olarak kullanılmaktadır.

Yirminci yüzyılın başlarında yapılan araştırmalara göre propolisin kaynağının kavak ağaçları olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında bal arılarının propolis kaynağı olarak kullandıkları çam, huş, karaağaç, meşe, diş budak, akçaağaç, fındık, kızılağaç, erik, söğüt, okaliptüs, kestane, ıhlamur, akasya ve göknar gibi ağaçlar olup; kullanılan bu bitki türleri bölgeden bölgeye, iklime, toplanma zamanına ve mevsime göre farklılıklar göstermektedirler.

Araştırmacılar arıların balmumu ile karıştırdıkları propolisin bazı bitkilere özgü proteinleri de yapısında bulundurduğunu, propolisin mumsu kısmının bitkisel mum yapısında olduğunu vurgulamışlardır. Propolis; toplandığı yöreye ve kaynağına bağlı olarak sarı yeşilden koyu kahverengine kadar rengi değişen, yapışkanımsı, zamksı bir maddedir. Propolisin, ciltte bulunan yağlar ve proteinlerle oldukça güçlü etkileşimi olduğundan, insan cildinden çıkması zordur. Ilıman iklime sahip olan bölgelerde üretilen propolisin kahverengi, tropik bölgelerde üretilen propolisin siyah, Küba'da üretilen propolisin ise menekşe renginde olduğu, hatta saydam propolisin bile var olduğu belirtilmiştir.

Propolisin Fiziksel Özellikleri

Propolis bazı bitkilere özgü proteinleri de yapısında bulundurur. Bu sebepten dolayı propolisin mumsu kısmının bitkisel mum yapısında olduğu belirtilmiştir (Kumova ve ark., 2002; Durán ve ark., 2007).

Propolis; 10 °C'nin altında sert ve kırılgan, 15–25 °C arasında mum kıvamında elastik bir yapı göstermekte, 30–40 °C'de yumuşayıp yapışkan bir durum almakta ve bu durumda özellikle yaz aylarında arıcıların çalışmasını güçleştirmekte, 80 °C'de ise kısmen erimektedir. Kovandan alındığı zaman yapışkan ve kendine özgü bir kokusu vardır. Dondurucuya konulduğunda hemen katılaşmaktadır. Propolis; aseton, eter gibi organik çözücülerde kısmen çözünürken, %95'lik etil alkolde büyük oranda çözünmektedir. Suda ise çok az çözünmekte veya hiç çözünmemektedir. Tıbbi alanda propolisin %70'lik etil alkolde çözünmüş hali kullanılmaktadır (Kumova ve ark., 2002; Durán ve ark., 2007).

Propolisin Kimyasal Yapısı

Propolisin kimyasal yapısı, elde edildiği bitki orijinine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Propolis, genel olarak; % 45–55 reçine, % 23–35 mumlar ve yağ asitleri, % 10 esansiyel yağlar, % 5 polen ve % 5 diğer organik maddeler ve mineralleri içermektedir (Scazzocchio ve ark., 2006). Kovanlardan toplanan propolis ve petek balmumu örnekleriyle yapılan bir çalışmada, propolis örneklerindeki balmumu içeriğinin % 11.2-29.3 arasında olduğu bildirilmiştir. Her iki tip balmumunda da monoesterler en büyük kısımları (% 62.1–86.6) oluşturmuştur. Monoesterleri ise; hidrokarbonlar (% 6.9-24.7) takip etmiştir (Polat ve Koçan, 2006).

Propolis genellikle, polifenoller (flavonoid aglikonlar, fenolik asit ve esterleri, fenolik aldehidler, alkoller ve ketonlar), terpenoidler, steroidler, aminoasitler ve inorganik bileşikler gibi çok çeşitli biyoaktif bileşenler içermektedir. Propolis yapısında bulunan fenolik bileşikler hücrelerin oksidatif stresini nötralize etme kapasitesini arttırır; antiinflamatuar ve antioksidan etkileriyle hücre ölümlerini engellemeye yardımcı olurlar (Nirala ve ark., 2008). Propolisin kimyasal kompozisyonu ile ilgili yapılan araştırmalarda, propolisin; miristik asit, benzoik asit, benzil alkol, vanilin, sinnamik asit, pinocembrin, pinobanksin, kuersetin, galangin, apigenin, krisin, kafeik asit, acacetin, kamferide ve izovanilin gibi kimyasal bileşikler içerdiği tespit edilmiştir (Dığrak ve ark., 1995; Salomão ve ark., 2004; Uzel ve ark., 2005).

Propolisten izole edilen bileşenlerin en geniş grubunu oluşturan flavonoidler, propolisin biyolojik aktivitesinin önemli bir kısmından sorumludurlar. Propolisteki tanımlanmış maddeler, gıda bileşenlerine, gıda katkı maddelerine ve/veya GRASS (generally recognized as safe) maddelere benzemektedirler. Yapılan araştırmalarda propoliste doğal olarak gıdaların bileşiminde yer alan % 0.1 düzeyinde hidrokinon, % 2-20 düzeyinde kafeik asit ve esterleri, ĸ% 0.1-0.7 kuersetin tespit edilmiştir. Bira ve kahvede 1.25 – 40 ppm düzeyinde hidrokinon belirlenmiştir. Kuersetin, kafeik asit ve esterlerinin gıdalarda resmi olarak kullanımı onaylanmamıştır. Ancak propolisin tüketimiyle alınan bu maddelerin miktarının, günlük gıda alımıyla karşılaştırıldığında önemsiz düzeyde olduğu görülmüştür (Çizelge 1).

Propolis karoten açısından zengindir; B1, B2, B6, A, C, E ve niasin gibi vitaminleri yapısında bulundurur. Propolis bünyesindeki bileşikler proteinler, amidler, aminler ve aminoasitlerdir. Azot, propolis içerisinde % 0.7 oranında bulunur ve bu miktarı aspartik, glutamik, triptofan, lösin, fenilalenin, metiyonin, sistin, serin, valin, histidin, arjinin, tirozin, prolin, treonin ve lizin gibi aminoasitler oluşturur. Şu ana kadar propolisin büyük bir kısmının organik çözücülerde çözündüğü bilinmesine rağmen, halen içerdiği pek çok madde bilinmemektedir (OECD-FAO, 2016).

Mangan, çinko, barit, bakır, titan, kurşun, kobalt, nikel, krom, vanadyum, kalsiyum, fosfor, kalay, kükürt, sodyum, potasyum, demir, magnezyum, klor, molibden, aliminyum, civa, selenyum, silisyum, flor, sirkonyum ve antimon propolisin içeriğinde bulunan mineral maddelerdir (Özan, 2006). Araştırmacılar propolisin bazı enzimleri yapısında bulundurduğunu da belirtmişlerdir. Bu enzimler; süksinik dehidrogenaz, glukoz-6-fosfataz, adenozin trifosfataz ve asit fosfatazdır (Hepşen ve ark., 1996).

Çizelge 1. *Propoliste belirlenen kimyasal bileşikler (Kumova ve ark., 2002)*

Bileşikler	**Tanımlanan Bileşik Sayısı (adet)**
Flavonoidler	38
Hidroksiflavonlar	27
Hidroksiflavononlar	11
Kalkonlar	2
Benzoik Asit ve Türevleri	12
Asitler	8
Esterler	4
Benzaldehit Türevleri	2
Sinamil ve Sinamik Asit ile türevleri	14
Alkoller, Ketonlar, Fenoller	8
Heteroaromatik Bileşikler	12
Terpen ve Sekuterpen ve Türevler	7
Alifatik Hidrokarbonlar	6
Sekuterpen ve Triterpen Hidrokarbonlar	11
Steroller ve Steroid Hidrokarbonlar	6
Mineraller	22
Şekerler	7
Aminoasitler	24

Propolisin kimyasal bileşimi toplanıldığı alana göre farklılık gösterir. Propolisi toplamak için kullanılan bitki kaynağının bileşimi ile propolisin toplandığı alanın vejetasyonu da önemlidir. Propolisin toplanma zamanı da aynı bölgeden toplanan propolisin kimyasal içeriğini etkileyebilmektedir. Örneğin Akdeniz Bölgesi'nden (Sicilya ve Adriyatik kıyıları) elde edilen propolis tek tip özellik gösterir; temel bileşeni diterpenik asitlerdir. Buna karşın Brezilya'dan toplanan propolis farklı tip özellik göstermektedir. Propolisin içerdiği bileşenlerin çeşidi ve miktarı toplanan bitkinin türüne göre de farklılık gösterir. Propolis için en önemli kaynağın *Popolus nigra* (kara kavak) olduğu düşünülmektedir. Bu durumun nedeni ise birçok bileşiğin bitki özsuyundan hiçbir değişikliğe uğramadan propolis yapısına katılmasıdır (Hepşen ve ark., 1996).

Asya, Avrupa, Kuzey Amerika gibi karasal iklime sahip olan alanlardan toplanan propolisin ana kaynağının kavak ağacı tomurcukları olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda bu propolisin çeşitli flavonoidlerini içeren fenolik bileşikler ve aromatik esterlerce zengin olduğu da belirtilmiştir. Karasal bölgelerde yaygın olarak görülen kavak ağacı tropik ve subtropik bölgelerde yetişmemektedir. Bu nedenle bu bölgedeki bal arıları propolis kaynağı olarak farklı bitkilere yönelmektedir. Bu sebeple bu bölgelerde üretilen propolisin kimyasal içeriği diğerlerine göre farklılık göstermektedir.

Örneğin Brezilya propolisinin ana bitkisi '*Baccaris dracunculifolia*'dır ve kavak tipi propolisten tümüyle farklı olarak diterpenler, lignanlar ve flavonoidler içerdiği tespit edilmiştir. Bunun yanında Küba propolisinin yapısı da içerdiği poliizoprenillenmiş benzofenonlar sayesinde Avrupa ve Brezilya propolislerinden ayrılmaktadır. Venezuela ve Brezilya'dan elde edilen propolisin en önemli kaynaklarının *Clusia minör, Clusia majör, Araucaria heteroplhylla* ve çeşitli Baccharis türleri olduğu belirlenmiştir.

Yapılan araştırmalar sonucunda dünyanın farklı bölgelerinden toplanan propolis örneklerinde tespit edilen flavon ve flavonoidler; pinosembrin, pinobanksin,organik ve yağ asitleri, ferulik asit, kafeik asit, terpenler, lignanlar, ketonlar, 9-hekzadekanoik asit, hidrokarbonlu bileşiklerdir (Engür, 2007).

Propolisin Toplanması

Propolisin toplanması sırasında arı, mandibulaları ile propolisi bitkiden çekerek ayırır. Ağzında yumuşatır, bazı enzimleri ilave ederek pelet haline getirir. Ön bacakları yardımıyla arka bacaklarındaki polen sepetlerine aktarır ve bu aktarma işlemini yaklaşık 15-60 dakika içerisinde bitirir. Propolisi toplayan arı, kovana döndüğünde ayaklarıyla tutunarak propolisi peteğe aktarır. Genç işçi arılar mandibulalarıyla asılarak propolisi taşıyıcı arının polen sepetinden alıp gerekli alanlarda kullanırlar. Boşaltma işlemi propolisin kullanımına ve propolisi alan işçi arı sayısına bağlı olarak 30 dakika ile 2 gün arasında değişmektedir.

Genel olarak dip tahtası, örtü tahta araları ve uçuş deliği arkası, kovanda arıların propolisi en fazla biriktirdikleri yerlerdir. Uçuş deliği ve dip tahtasına biriktirilen propolis saf değildir. Bu durumun sebebi olarak mum kırıntılarının ve artık maddelerin propolisin içerisine karışması gösterilmektedir. En temiz propolis toplama metodunun kovanların üzerine konan propolis tuzaklarının kullanılması olduğu belirtilmiştir (Çifci, 2015).

Tuzak olarak bahsedilen yapı küçük delikler içeren levhalardır. Bu delikler kovan duvarındaki çatlaklara benzetilir. Arılar levhalardaki boşlukları kapatmaya çalışır ve böylece tuzakları propolis ile doldurur (Çifci, 2015).

Bir işçi arının tek seferde taşıdığı propolis miktarı ortalama 10 mg'dır. Ayrıca arıların propolisi toplayıp kovana taşımaları için sıcaklık, nem gibi

çevre koşullarının uygun olması gerekmektedir. Propolis verimi koloni başına ortalama 10-300 g arasında olup, her koloni için bu rakam değişmektedir. Toplanan propolis miktarı arının türü, ırkı, çevre koşulları, bitkisel çeşitliliğe bağlı olarak 600 g'a kadar çıkabilmektedir. Tuzak tipi toplama yöntemi propolis verimini etkileyen en önemli faktördür (Kutluca ve ark., 2006). Şekil 2'de propolisin kovandan toplanması görülmektedir.



Şekil 2. *Propolisin kovandan elde edilmesi*

Propolisin Arılar Tarafından Kullanımı

Arılar propolisi kovan iç yüzeyinin kaplanmasını, yarık ve çatlakların kapatılmasını, peteklerin kenarlarının sertleştirilip onarılmasını, yaz sonunda çerçevelerin bağlanması, kovan giriş deliğinin kolaylıkla savunacakları duruma getirilmesini, petek gözlerinin ana arı yumurtlamadan önce temizlenip cilalanmasını sağlamak amacıyla kullanırlar. Bunun yanında bazen kovanın dip tahtasında propolisi merdiven gibi kullanarak çerçevelere kadar çıkmak amacıyla da kullanırlar (Burdock, 1998).

Kovan içerisinde kapalı bir ortamda 50.000-80.000 ergin arı, bir o kadar da yavru (yumurta, larva, pupa) bulunmasına, kovan içi sıcaklığının (34 °C) ve rutubetin (% 40-65) de virüsler, bakteriler ve funguslar için çok ideal bir ortam oluşturmasına rağmen propolis koruyucu özelliğinden dolayı, bu hastalık etmenleri üreme imkanı bulamamaktadır (Albayrak ve Albayrak, 2008).

Kovan içerisinde, atmosferle karşılaştırıldığında daha az miktarda mikroorganizma bulunur. Bu durum propolisin kimyasal özelliklerini ve önemini göstermektedir. Propolisin yapısında uçucu bileşikler bulundurması kovan içerisinde mikroorganizma popülasyonunun çevreden daha az olmasını gösterir (Çifci, 2015).

Propolis, aslında kovanın hem temizlik hem de yalıtım maddesidir. Kış mevsimine hazırlanan arılar sonbaharda kovan girişini daraltmak, çatlakları ve gedikleri sıvamak, kovanın soğuk ve nem girebilecek her türlü deliği-

ni onarmak amacıyla tüm bu alanları propolisle kaplar. Propolis böylelikle arıların en önemli barınağı olan kovanlarını hem kışın soğuğundan hem de dışarıdan gelebilecek mikroplardan korumuş olur. İlkbaharda dışarı çıkmak için yine propolise ihtiyaç vardır.

Öncelikle eski propolisler sökülür, kovan içinde hep birlikte aynı anda kanat çırparak kovan havalandırılır ve ilkbaharla birlikte arı yavruları (larvalar) için tüm petek gözleri propolisle temizlenir ve cilalanır. Ana arı (kraliçe arı), yumurtalarını bu petek gözlere teker teker bırakacak ve her bir gözde, büyüdüğünde yaz boyunca bal yapmak için çalışacak genç, güçlü, çalışkan arıları meydana getirecek yavrular oluşacaktır.

Arılarda bakım kusursuzdur. Bakıcı arılar daha kraliçe arı yumurtlamadan, her bir gözü propolisle siler, parlatır. Propolisin yoğun antimikrobiyal özelliği arı larvalarını her türlü hastalıktan korurken, antioksidan ve hücre yenileyici özellikleri larvaların arı sütünün de yardımıyla çok hızlı büyüyüp gelişmesini ve sağlıklı kalmasını sağlar. Petek gözlerin propolisle temizliği, balın depolanacağı, yumurta bırakılmayacak gözler için de geçerlidir. İşte arının topladığı ve kendine özgü bir şekilde yoğurduğu bu ürün, hem balına hem de yavrusuna hijyenik bir ortam sağlamak ve tüm tehlikelerden korumak amacıyla kullandığı müthiş bir yöntemdir.

Propolisin Etkileri

İçeriğindeki çok sayıda etken bileşik sayesinde propolisin bazı biyolojik etkileri vardır. Ancak her propolis aynı etkilere sahip değildir. Çünkü her bölgede arıların propolis topladığı bitkiler farklıdır. Bunun sonucunda da propolisin hem içeriğinde hem de biyolojik etkilerinde çeşitlilik ortaya çıkar. En önemli özelliği antimikrobiyal özelliğidir. Propolisin antimikrobiyal aktivitesinden flavonoidler, aromatik asitler ve esterlerinin sorumlu olduğu düşünülmektedir. Bunun yanında pinosembrin, galangin ve pinobanksinin de antimikrobiyal aktivite üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Pinosembrin aynı zamanda antifungal özellik de göstermektedir. Antimikrobiyal etki ile ilgili aktif olan diğer bileşikler kumarik ve kafeik asit esterleridir (Castaldo ve Capasso, 2002). Propolis üzerinde yapılan araştırmalar, bu maddelerin antimikrobiyal özellikler taşımasının yanı sıra insan sağlığı için çok önemli ve gerekli olan vitamin ve mineralleri de içerdiğini göstermiştir. Bunun yanında iltihap önleyici, ülser önleyici, lokal anestezik, karaciğer koruyucu, bağışıklık sistemini güçlendirici etkileri de sayılabilir. Üstelik propolisin her geçen gün yeni etkileri keşfedilmektedir.

Propolisin antioksidan, antimikrobiyal etkileri gıda teknolojisi alanında kullanım imkânı sağlamaktadır. Propolisin en yaygın bilinen, en çok araştırılan ve gıda ürünlerinin dayanıklılığı konusunda katkı sağlayan en önemli özelliklerinden biri antimikrobiyal aktivitesidir. Propolisin çeşitli bakteri, mantar, virüs ve diğer mikroorganizmalara etkisi ile ilgili birçok bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir.

Propolisin sahip olduğu antioksidan, antimikrobiyel ve antifungal etkisinden dolayı gıda endüstrisinde tercih edilen bir ürün olmuştur. İnsan sağlığına olan yararlı etkileri de kullanımının özel bir avantajı olmuştur. Meyve sularında antifungal aktivitesi, peynirlerde küf gelişimi ve toksin oluşumunu engelleyici özelliği vardır. Ayrıca sosislerin raf ömrünü arttırıcı, gıdaları *E. coli*'ye karşı koruyucu özelliği vardır (Çifci, 2013).

Propolis çok farklı kimyasal maddeler içerir. Ayrıca antibakteriyel etkisinden dolayı kovan içinde arılar tarafından kullanımı dışında, ilaç ve kozmetik sanayi ile apiterapi merkezlerinde de çok yönlü olarak kullanılan bir maddedir. Propolisin bu kadar geniş kullanım alanı bulunmasına rağmen, üretim teknikleriyle ilgili ülkemizde ve hatta dünyada yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır (Anonim, 2014).

Propolisteki tanımlanmış maddeler gıda bileşenlerine, gıda katkı maddelerine ve/veya GRASS maddelere benzemektedir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, propolisin antimikrobiyal koruyucu olarak bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle propolisin gıda sistemlerinde pratik olarak uygulanabilirliğinin araştırılması gerektiği belirtilmiştir.

Propolis İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Propolisin yapısı ve özellikleriyle ilgili çalışmalar 20. yüzyılın başlarında başlayarak bu dönemde yapılan çok az sayıdaki çalışmada karakavağın propolis kaynağı olduğu bildirilmiş ve arılar tarafından balmumuna karıştırıldığı, propolisin mumsu kısımlarının bitkisel mum olduğu bildirilmiştir. Propolisi kimyasal bileşiklerine ayırmak oldukça güçtür. Ancak son yıllarda High Performance Liquid Chromatogaphy (HPLC), Mass Spectrometry ve Gas Chromatogaphy (MS-GC) teknikleri kullanılarak propolis içerisinde çok az miktarda bulunan ve organik çözücülerde çözünen 149 bileşik ve 20 iz element tespit edilmiştir.

Türk propolisinin kimyasal kompozisyonunu belirlemek amacıyla 1999 yılında yapılan bir çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerinden (Bursa, Erzurum-Aşkale, Gümüşhane-Sogutagil ve Trabzon-Çağlayan) propolis örnekleri toplanmış, kimyasal analizleri için propolisin etanol ekstraktları hazırlanmış ve GC-MS yöntemi ile incelenmiştir. Trabzon ve Gümüşhane yöresinden alınan propolis örneklerinin benzer kimyasal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Her iki örnekte aromatik asitler, alifatik asitler ve esterleri ve keton türevleri temel bileşik grupları olmuştur. Erzurum yöresinden toplanan tek örnek, kimyasal kompozisyon bakımından diğer iki örnekten daha çok farklılık göstermiştir. Bu propolisteki başlıca bileşiklerin aromatik asit esterleri ve alkoller olmasının yanı sıra, diğerleriyle karşılaştırıldığında fazla miktarda amino asit içerdiği de tespit edilmiştir. Bursa'nın farklı üç yöresinden toplanan örnekler de flavononlar, aromatik asitler ve esterleri ile terpenoidler, flavonlar ve ketonlarca zengin olduğu bulunmuştur (Kutluca ve ark., 2006).

Başka bir çalışmada; propolisin etanolik ekstraktının *Staphylococcus aureus*'un biyofilm oluşumuna, lipaz ve koagulaz enzimleri gibi bazı önemli virülans faktörlere karşı etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Virülans faktör koagülazın tamamen baskılandığı, lipazın güçlü bir şekilde indirgendiği ve doza bağlı olarak biyofilm oluşumunun gözle görülebilir bir şekilde önlendiği bildirilmiştir (Lu ve ark., 2005).

Yağ ilave edilmiş et ürünlerinin 8 haftalık muhafaza periyodu esnasında % 0.02 ve % 0.4 lük etanolik propolis ekstraktı (EEP) ve % 0.28 potasyum sorbat (PS) uygulanmış ve % 0.4 EEP ile muamele edilen et ürünlerinin muhafaza süresinin, % 0.28 PS ile muamele edilenlerden daha uzun olduğu tespit edilerek propolisin et ürünlerinde koruyucu bir madde olarak kullanılabileceği önerilmiştir (Kutluca ve ark., 2006).

Ayrıca propolisin donmuş balığın muhafazasında depo ömrünü iki üç kat artırdığı, ızgaralık piliçlerin yemlerine belli bir miktar propolis eklenmesi durumunda ise piliçlerin kilo artışının % 20 oranında artış gösterdiği belirtilmiştir (Kutluca ve ark., 2006).

Bingöl İli ve çevresinden toplanan bal ve propolis örneklerinin antimikrobiyal etkisi; *Klebsiella pneumoniae* ATTC 13883, *Enterobacter cloaca* ATTC 13047, *Escherichia coli* ATCC 8739, *Pseudomonas aeroginosa* 9027, *Staphylococcus aureus* 6538, *Bacillus subtilis* IMG 22, *Bacillus megaterium* DSM 32, *Micrococcus luteus* LA2971, *Mycobacterium smegmatis* RUT, *Bacillus brevis* FMC 3, *Enterobacter aeroginosa* ATCC 27859, *Corynebacterium xerosis* ATCC 373 bakterileri ile *Kluyveromyces marxianus* 332, *Rhidotorula rubra* 116, *Candida albicans* 30114 maya türleri kullanılarak test edilmiştir. Analizler sonunda propolis ve bal örneklerinin Gram (+) ve Gram (-) bakterilere karşı antimikrobiyal; mayalara karşı da antifungal aktiviteye sahip olduğu belirlenmiştir (Aksoy ve Dığrak, 2006).

Biray ve ark. (2006); propolisin CCRF-CEM hücre dizisinde sitotoksik ve apoptotik özelliklerini ortaya koymuşlardır. Sitotoksisite ile ilgili olarak Tripan mavisi yöntemi ve XTT yöntemleri; apoptozise ile ilgili olarak apoptozis sırasında açığa çıkan oligonükleotidlerin belirlenmesi esasına dayalı Eliza yöntemi ve apoptotik cisimciklerin floresan mikroskopta görünmesini sağlayan Akridin Oranj- Etidyum Bromid boyama tekniği kullanılmıştır. Propolisin sitotoksik etkiye sahip olduğu belirlenmiş ardından propolisin etken maddelerinden sinamik asit ve CAPE (Kafeik asit fenetil ester)'in sitotoksik etkileri aynı yöntemlerle belirlenmiştir. Araştırma sonunda sinamik asit herhangi bir sitotoksik etki göstermemiştir. CAPE ise doz ve zamana bağlı olarak sitotoksik etki göstermiştir. Akridin Oranj-Etidyum Bromid boyama tekniği ile CAPE'nin aynı hücre dizisinde apoptozise neden olduğu saptanmıştır.

2006 ylında yapılan bir çalışmada Hatay ilinden toplanan propolis numune ekstraktlarının tarımsal açıdan zararlı olduğu bilinen 13 farklı türde

bakteriler üzerindeki antibakteriyal etkileri *in vitro* koşullarda incelenmiştir. Ekstraktlar saf metanol ile hazırlanmış olup, maksimum duyarlılık 1/5'lik polen ekstraktının *Agrobacterium tumefaciens* bakterisine karşı 12 mm inhibisyon zonu olarak belirlenmiştir. Örneklerin 1/10'luk ekstraktı *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* bakterisine karşı 17 mm inhibisyon çapı ile en etkili olduğu belirtilirken, propolisin 1/1000 ve polenin 1/100'lik ekstraktlarının söz edilen mikroorganizmalar üzerinde etkisinin gözlendiği belirtilmiştir (Basim ve ark., 2006) .

Santos ve ark. (2002) Brezilya'nın belirli bölgelerinden elde edilen propolisler üzerine araştırma yapmışlardır. Propolis sulu etanolik ekstraktı ve elde edilen türevlerinin periodontit problemine sebep olan bakteriye karşı inhibitör aktivitesi belirlenmiştir. Bu bakterilerin propolise karşı duyarlı olduğu bulunmuştur.

Bosio ve ark. (2000); İtalya'nın Kuzey-Batısında farklı alanlardan iki propolis örneği toplamışlar ve bunların etanolik ekstraktlarının 46 *Streptococcus pyogenes* suşuna karşı gösterdiği antibakteriyal etkileri araştırılmıştır. Bu iki propolisden birinin daha yüksek etki gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca yüksek antibakteriyal etki gösteren bu ekstraktın flavonoidlerden pinocembrin ve galangin açısından daha zengin olduğu HPLC kullanılarak kanıtlanmıştır.

Ankara ili Kazan ilçesi ve Marmaris bölgelerinden elde edilen iki propolis örneğinin antibakteriyal aktivitesinin disk difüzyon metodu ile incelendiği bir araştırmada; antibakteriyal aktivite, dört farklı etanolik ekstrakt (% 30, % 50, % 70, % 96 etanol) 7 Gram (+), 4 Gram (-) ve bir maya kültürüne karşı denenmiştir. Sonuçta propolisin antibakteriyal aktivitesinin kafeik asit ve esterlerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir (Kartal ve ark., 2003).

Farklı coğrafik bölgelerden toplanan propolis numunelerinin antibakteriyal (*S. aureus* ve *E. coli*), antifungal (*Candia albicans*) ve antiviral (*Avian influenza*) etkilerini belirlemek üzere başka bir çalışma yapılmıştır. Bütün örneklerin fungus ve Gram (+) örneklere karşı etkili olduğu bulunurken; en fazla etkinin antiviral aktivite ile gösterildiği belirtilmiştir (Kujumgiev ve ark., 1999).

Silici ve Kaftanoğlu (2003) Bursa, İzmir, Kayseri, Sivas, Yozgat, Erzurum, Hatay, Artvin bölgelerinden topladıkları propolis örneklerinin *S. aureus* ve *E. coli* üzerindeki antibakteriyal etkilerini araştırmışlardır. Örneklerin tümü *S. aureus* üzerine inhibitör aktivite göstermişken, *E. coli* üzerinde gözlenen inhibitör aktivite nispeten daha zayıf bulunmuştur.

Lu ve ark. (2005) Tayvan'ın farklı bölgelerinden (Taipei, Mingchien ve Fanglia) farklı mevsimlerde (Haziran-Temmuz, Ekim-Kasım) toplanan propolisin etanolik ekstraktlarının (EEP) *S. aureus* üzerindeki antimikrobiyal etkisini belirlemişlerdir. Hücre yaşının, inkübasyon sıcaklığı ve pH değerinin

öneminden bahsetmişlerdir.

Yapılan bir diğer araştırmada propolisin %70'lik etanolik ekstraktlarının antimikrobiyal aktiviteleri periodontopatik mikroorganizmalar (*Prevotella intermedia, Prevotella melaninogenica, Porphyromonas gingivalis, Actinobacillus actinomycetemcomitans, Capnocytophaga gingivalis, Fusobacterium nucleatum* ve ayrıca *Candida albicans, Pseudomonas aeruginosa, E. coli, S. aureus*) üzerinde *in vitro* koşullarda belirlenmiştir. Çalışma sonucunda propolis ekstraktlarının sözü edilen mikroorganizmalar üzerinde antimikrobiyal aktiviteye sahip olduğu bulunmuştur (Gebara ve ark., 2002).

İran'da yapılan bir araştırmada İran propolisinin etanolik ekstraktının bazı mikroorganizmalar üzerinde sahip olduğu antimikrobiyal etkisi disk difüzyon yöntemiyle belirlenmiştir. Numunelerin sadece Gram (+) bakteriler ve funguslara karşı aktivite gösterdiği, Gram (-) bakteriler üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir (Yaghoubi ve ark., 2007).

Özen ve ark. (2010) Türkiye'nin farklı bölgelerinden toplanan propolis örneklerinin antimikrobiyal aktivitelerini araştırmışlardır. Bu amaçla agar dilüsyon yöntemi ile makro tüp dilüsyon yöntemini kullanmışlardır. Araştırma sonucunda propolis örneklerinin incelenen tüm mikroorganizmalar üzerinde etkili olduğu bulunmuştur.

Litvanya'nın çeşitli bölgelerinden 10 farklı propolis örneği toplanmış ve kimyasal kompozisyonu ile antimikrobiyal etkileri araştırılmıştır. Etanolik ekstraktların Gram (+), Gram (-) bakteriler ve mayalara karşı etkili olduğu bulunmuştur. Bu durumun sebebinin propolis örneklerinin içerdiği fenolik bileşikler olduğunu düşünmüşlerdir (Majiene ve ark., 2007).

Brezilya'nın farklı bölgelerinden propolis örnekleri toplanmış ve % 80 etanol ile ekstrakte edilmiştir. Ekstraktlarda toplam flavonoidlerin yoğunluğu belirlenmiştir. Flavonoidaglikonların bazı fraksiyonları; UV spektrofotometri, TLC ve HPLC yöntemleri ile analiz edilmiştir. Krizin, Kuersetin ve Galangin gibi toplam flavonoid ve flavonoidaglikonların konsantrasyonları önemli derecede değişmiş olup, bu durumun sebebi olarak da propolisin bitkisel kaynaklarından ileri geldiği ifade edilmiştir (Albayrak ve Albayrak, 2008; Çifci, 2015).

Pastörize edilmemiş elma, portakal, beyaz üzüm ve mandalina suyunda propolisin antifungal aktivitesinin incelendiği bir diğer çalışmada; meyve sularına sodyum benzoat ve etanolik propolis ekstraktı ilave edilmiş ve 2 gün oda sıcaklığında bekletilmiştir. Numunelerden *Candida kefyr, C. parapsilosis, C. famata, C. glabrata* ve *C. pelliculosa* izole edilmiştir. Araştırmanın sonunda propolisin sodyum benzoattan daha fazla antifungal aktiviteye sahip olduğu saptanmıştır (Silici ve ark., 2005).

2007 yılında yapılan bir çalışmada Ras peynirinde *Aspergillus versico-*

lor gelişimi ve olgunlaşma sürecinde sterigmatosistin biyosentezi üzerindeki propolis etkisi araştırılmıştır. Propolisin 250, 500 ve 1000 ppm konsantrasyonlarında sulu çözeltisi peynir yüzeylerine uygulanmıştır. 90 günlük olgunlaşma süresince 1000 ppm'in küf gelişimini ve toksin oluşumunu tamamen engellediği belirlenmiştir (Aly ve Elewa, 2007).

Türkiye'nin farklı bölgelerinden toplanan propolis örneklerinin antimikrobiyal aktivitesi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Toplanan propolislerin etanol ekstraktlarının *Enterococcus faecalis, Streptococcus sobrinus, Micrococcus luteus*, *Candida albicans, C. krusei, Streptococcus mutans, Staphylococcus aureus, Staphylococcus epidermidis, Enterobacter aerogenes, Escherichia coli, C. tropicalis, Salmonella* typhimurium ve *Pseudomonas aeruginosa* üzerinde antimikrobiyal etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Albayrak ve Albayrak, 2008).

Yurtdışında gerçekleştirilen farklı çalışmalarda da propolisin antimikrobiyal aktivitesi araştırılmıştır. Bulgaristan, Türkiye, Yunanistan ve Cezayir'den toplanan propolislerin güçlü antibakteriyal, zayıf ve orta derecede antifungal aktivite gösterdikleri belirtilmiştir (Çifci, 2015).

Brezilya'da yürütülen 2 araştırmanın birinde farklı bölgelerden toplanan propolisin etanolik ekstraktlarının oral patojen olan *Streptococcus*'un gelişimini inhibe ettiği bulunmuştur. Yürütülen ikinci çalışmada ise toplanan dört farklı propolis örneğinin antibakteriyal aktivite gösterdiği belirlenmiştir (Albayrak ve Albayrak, 2008).

Serra ve Escola (1995) 12 farklı propolis örneğini içeren bir çalışma yürütmüşlerdir. Propolis örneklerinden elde ettikleri fenolik bileşiklerin antimikrobiyal aktivitelerini araştırmışlar ve sonuç olarak bakteriyostatik aktivite ile flavonoidler arasında ilişki olduğunu saptamışlardır. *B. subtilis* ve *S. aureus*'u inhibe etmek için en az 60-80 µg/ml; *E. coli*'yi inhibe etmek için ise 600-800 µg/ml propolis gerektiğini belirtmişlerdir.

Mirzoeva ve ark. (1997); propolisin *B. subtilis, E. coli* ve *Rhodobacter sphaeroides* bakterilerinin fizyolojisi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Propolisin etanolik ekstraktlarının antibakteriyal etkiye sahip olduğunu bulup; propolis ve sinamik asitleri ile flavonoidlerinin bakteriyal hareketi önlediğini belirtmişlerdir.

Boyanova ve ark. (2006); propolisin *Clostridium, Bacteroides* ve *Propionibacterium*'a karşı aktif olduğunu bildirmişlerdir. Propolisin *S. mutans*'a karşı inhibe edici özelliğinin bulunmasına rağmen, bununla ilgili bilgilerin sınırlı olduğunu belirtmişlerdir. Propolisin etanolik ekstraktlarının antimikrobiyal aktivitesini ampisilin, gentamisin ve streptomisinin önemli derece arttırdığını; kloramfenikol, seftriakson ve vankomisinin orta derecede arttırdığını, eritromisinin de değiştirmediğini bildirmişlerdir.

Propolisin; *Trypanosoma cruzi*'ye karşı inhibitör etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Salomão ve ark. (2004) Brezilya ve Bulgaristan'dan toplanan propolislerin etanolik ekstraktlarının sözü edilen bakteriye karşı etkili olduğunu bulmuşlardır. Aynı şekilde Marcucci ve ark. (2001) da propolisin patojen olan bu mikroorganizmaya karşı etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda kullanılan propolis örnekleri farklı kimyasallarda çözündürülerek ekstraktları kullanılmıştır. Propolisin ekstrakte edilmesinde etanol, metanol, glikol, su ve yağ kullanılır. Propolisin kullanım amacına göre ekstraksiyon yöntemleri değişir veya bunların değişik kombinasyonları uygulanır (Çifci, 2013).

Sonuç

Arıcıların kovanlardaki balı almalarında zorluk çıkartan propolis, önceleri bir atık olarak görülmüştür. Daha sonra yıllar içerisinde yapılan çalışmalar ile antimikrobiyal, antioksidan vb. özellikleri olduğu anlaşılınca, çeşitli gıdalarda ve farklı sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalar daha çok tıp alanında olsa da gıda sektöründe de raf ömrünü uzatmak amacıyla doğal bir katkı maddesi olarak kullanımı üzerine çalışmalar mevcuttur. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda herhangi bir olumsuz özelliği saptanmayan propolis üzerinde daha fazla çalışma yapılmalı ve her yönüyle incelenip gıdalarda kullanım olanakları da belirlenmelidir. Böylece kimyasal madde kullanımı azaltılmış olunacaktır.

KAYNAKLAR

Aksoy, Z. ve Dığrak, M., 2006, Bingöl yöresinde toplanan bal ve propolisin antimikrobiyal etkisi üzerinde in vitro araştırmalar, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18 (4), 471-478.

Albayrak, S. ve Albayrak, S., 2008, Propolis: doğal antimikrobiyal madde, *Ankara Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 37 (3), 201-115.

Aly, S. A. ve Elewa, N. A., 2007, The effect of Egyptian honeybee propolis on the growth of Aspergillus versicolor and sterigmatocystin biosynthesis in Ras cheese, *Journal of dairy research*, 74 (1), 74-78.

Anonim, 2014, http://www.apider.org/propolis.html

Aymerich, T., Picouet, P. A. ve Monfort, J. M., 2008, Decontamination technologies for meat products, *Meat Science*, 78 (1), 114-129.

Basim, E., Basim, H. ve Özcan, M., 2006, Antibacterial activities of Turkish pollen and propolis extracts against plant bacterial pathogens, *Journal of Food Engineering*, 77 (4), 992-996.

Biray, Ç., Gündüz, C., Yılmaz, B., Şahin, F. ve Topçuoğlu, N., 2006, Propolis ve etken maddeleri olan kafeik asit fenetil ester (cape) ve sinamik asitin, insan t hücreli akut lenfoblastik lösemi hücre dizisi (CCRF-CEM)'de sitotoksik ve apoptotik etkinliğinin değerlendirilmesi, *Ege Tıp Dergisi*, 45 (2).

Bosio, K., Avanzini, C., D'avolio, A., Ozino, O. ve Savoia, D., 2000, In vitro activity of propolis against Streptococcus pyogenes, *Letters in Applied Microbiology*, 31 (2), 174-177.

Boyanova, L., Kolarov, R., Gergova, G. ve Mitov, I., 2006, In vitro activity of Bulgarian propolis against 94 clinical isolates of anaerobic bacteria, *Anaerobe*, 12 (4), 173-177.

Burdock, G., 1998, Review of the biological properties and toxicity of bee propolis (propolis), *Food and Chemical toxicology*, 36 (4), 347-363.

Castaldo, S. ve Capasso, F., 2002, Propolis, an old remedy used in modern medicine, *Fitoterapia*, 73, S1-S6.

Çakır, M., 2013, Farklı tuz (NaCı, KCı) ve karragenan (İOTA, KAPPA) çeşitlerinin tavuk göğüs etinin bazı emülsiyon özellikleri üzerine etkilerinin belirlenmesi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya.

Çifci, F., 2015, Propolisin yoğurt üretiminde kullanılması, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi*, Samsun.

Devlieghere, F., Vermeiren, L. ve Debevere, J., 2004, New preservation technologies: possibilities and limitations, *International Dairy Journal*, 14 (4), 273-285.

Dığrak, M., Yılmaz, Ö., Çelik, S. ve Yıldız, S., 1995, Propolisteki yağ asitleri ve antimikrobiyal etkisi üzerinde in vitro araştırmalar, *Gıda*, 20 (4), 249-255.

Durán, N., Marcato, P., Buffo, C., De Azevedo, M. ve Esposito, E., 2007, Poly (ε-caprolactone)/propolis extract: microencapsulation and antibacterial activity evaluation, *Die Pharmazie-An International Journal of Pharmaceutical Sciences*, 62 (4), 287-290.

Engür, T., 2007, Kayseri propolisinin kimyasal yapısı ve standardizasyonu, *Erciyes Üniversitesi*, Kayseri.

Faustman, C. ve Cassens, R., 1990, The biochemical basis for discoloration in fresh meat: a review, *Journal of Muscle Foods*, 1 (3), 217-243.

Gebara, E. C. E., Lima, L. A. ve Mayer, M., 2002, Propolis antimicrobial activity against periodontopathic bacteria, *Brazilian Journal of Microbiology*, 33 (4), 365-369.

Ghisalberti, E. L., 1979, Propolis: a review, *Bee world*, 60 (2), 59-84.

Hepşen, İ. F., Tilgen, F. ve Er, H., 1996, Propolis: Tıbbi özellikleri ve oftalmolojik kullanımı, *İnönü Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 3 (4), 386-391.

Kartal, M., Yıldız, S., Kaya, S., Kurucu, S. ve Topçu, G., 2003, Antimicrobial activity of propolis samples from two different regions of Anatolia, *Journal of ethnopharmacology*, 86 (1), 69-73.

Khalil, A., 1999, Quality of French fried potatoes as influenced by coating with hydrocolloids, *Food Chemistry*, 66 (2), 201-208.

Kujumgiev, A., Tsvetkova, I., Serkedjieva, Y., Bankova, V., Christov, R. ve Popov, S., 1999, Antibacterial, antifungal and antiviral activity of propolis of different geographic origin, *Journal of ethnopharmacology*, 64 (3), 235-240.

Kumova, U., Korkmaz, A., Avcı, B. C. ve Ceyran, G., 2002, Önemli bir arı ürünü: propolis, *Uludağ Arıcılık Dergisi*, 2002 (2).

Kutluca, S., Genç, F. ve Korkmaz, A., 2006, Propolis, *Samsun Tarım İl Müdürlüğü Çiftçi Eğitimi ve Yayım Şubesi*, Samsun.

Lu, L.-C., Chen, Y.-W. ve Chou, C.-C., 2005, Antibacterial activity of propolis against Staphylococcus aureus, *International Journal of Food Microbiology*, 102 (2), 213-220.

Majiene, D., Trumbeckaite, S., Pavilonis, A., Savickas, A. ve Martirosyan, D. M., 2007, Antifungal and antibacterial activity of propolis, *Current Nutrition & Food Science*, 3 (4), 304-308.

Marcucci, M. C., De Camargo, F. A. ve Lopes, C. M. A., 1996, Identification of amino acids in Brazilian propolis, *Zeitschrift für Naturforschung C*, 51 (1-2), 11-14.

Mirzoeva, O. K., Grishanin, R. N. ve Calder, P. C., 1997, Antimicrobial action of propolis and some of its components: the effects on growth, membrane potential and motility of bacteria, *Microbiological Research*, 152 (3), 239-246.

Nirala, S. K., Bhadauria, M., Mathur, R. ve Mathur, A., 2008, Influence of α-tocopherol, propolis and piperine on therapeutic potential of tiferron against beryllium induced toxic manifestations, *Journal of Applied Toxicology*, 28 (1), 44-54.

Özen, T., Kılıç, A., Bedir, O., Koru, Ö., Sorkun, K., Tanyüksel, M., Kılıç, S., Gençay, Ö.,

Yıldız, O. ve Baysallar, M., 2010, In vitro activity of Turkish propolis samples against anaerobic bacteria causing oral cavity infections, *Kafkas Universitesi Veterinerlik Fakultesi Dergisi*, 16, 293-298.

Öztan, A., 2005, Et bilimi ve teknolojisi, *TMMOB (Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği)*.

Polat, G. ve Koçan, D., 2006, Propolis ve antimikrobiyal etkisi, *Türkiye 9. Gıda Kongresi* Bolu, 1003-1006.

Salomão, K., Dantas, A. P., Borba, C. M., Campos, L. C., Machado, D. G., Aquino Neto, F. R. ve Castro, S. L., 2004, Chemical composition and microbicidal activity of extracts from Brazilian and Bulgarian propolis, *Letters in Applied Microbiology*, 38 (2), 87-92.

Santos, F. A., Bastos, E. M. A., Uzeda, M., Carvalho, M. A. R., Farias, L. M., Moreira, E. S. A. ve Braga, F. C., 2002, Antibacterial activity of Brazilian propolis and fractions against oral anaerobic bacteria, *Journal of ethnopharmacology*, 80 (1), 1-7.

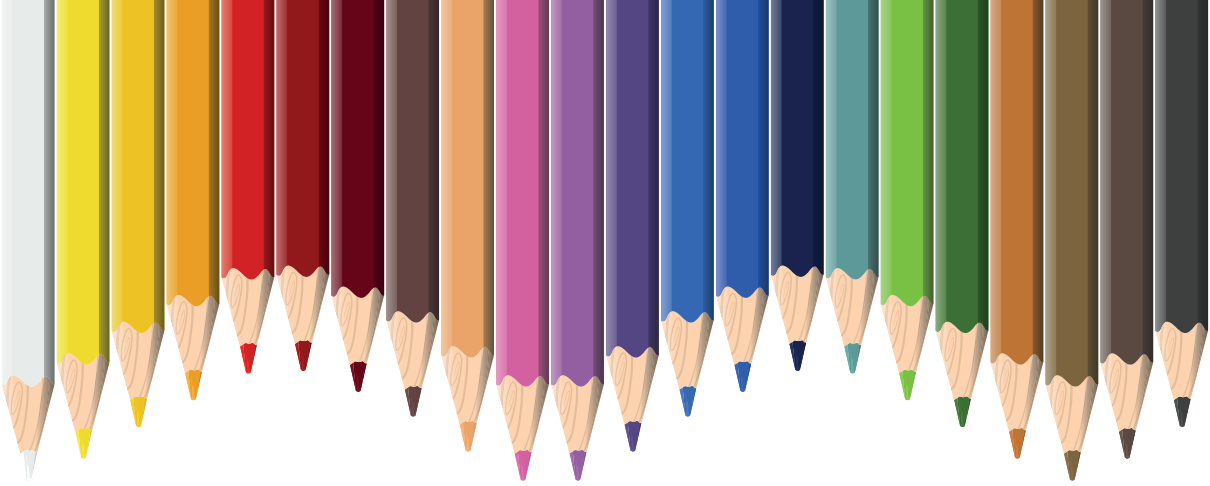
Serra, J. ve Escola, R., 1995, A study of the bacteriostatic activity of propolis, *Deutsche Lebensmittel-Rundschau*, 91 (8), 242-246.

Silici, S. ve Kaftanoğlu, O., 2003, Türkiye'nin farklı coğrafik bölgelerinden toplanan propolis örneklerinin antimikrobiyel analizi, *Uludağ Arıcılık Dergisi*, 2003 (3).

Silici, S., Koç, N. A., Ayangil, D. ve Çankaya, S., 2005, Antifungal activities of propolis collected by different races of honeybees against yeasts isolated from patients with superficial mycoses, *Journal of pharmacological sciences*, 99 (1), 39-44.

Uzel, A., Önçağ, Ö., Çoğulu, D. ve Gençay, Ö., 2005, Chemical compositions and antimicrobial activities of four different Anatolian propolis samples, *Microbiological Research*, 160 (2), 189-195.

Yaghoubi, M. J., Ghorbani, G. ve Satari, R., 2007, Antimicrobial activity of Iranian propolis and its chemical composition, *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*, 15 (1), 45-48.



Bölüm 25

TAHMİNSEL MODELLEMELERİN GIDA MİKROBİYOLOJİSİ AÇISINDAN ÖNEMİ

Ali SOYUÇOK[1]

1 Dr. Öğr. Üyesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur Gıda Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu,Gıda İşleme Bölümü, Burdur Türkiye.
ORCID: 0000-0003-2626-5827.
*e-mail: alisoyucok@gmail.com & asoyucok@mehmetakif.edu.tr

Giriş: Tahminsel Modellemenin Tanımı

Son yıllarda gıda kalitesi ve güvenliğiyle ilgili kaygılar artmaktadır. Gıda bütünlüğü ve güvenliği fiziksel, kimyasal ve biyolojik risklere maruz kalabilmektedir (Njage ve ark. 2017). Gıdalar enfeksiyon, intoksikasyon ve bozulmaya neden olan mikroorganizmalar ile kolaylıkla kontamine olabilmektedirler (Njage ve ark. 2017). Gıda endüstrisinin genişlemesi nedeniyle risklerin yönetilmesi ve tüketici sağlığının korunması giderek zorlaşmaktadır. Gıda işleme sırasında uygulanan prosesler mikroorganizmalarınn canlılığını etkileyerek inaktivasyona neden olabilir. Bu nedenle, mikrobiyal büyüme dinamiklerini (Dorota ve ark. 2014) ve mikroorganizmaların belirli çevre koşullarına (Dorota ve ark. 2014; Ross ve McMeekin, 1994) verdikleri tepkileri anlamak için mikrobiyal davranış parametrelerini bilmek çok önemli hale gelmektedir. Farklı çevresel koşullarda veri toplanması, mikrobiyal kinetiğin değerlendirilmesine olanak sağlamakta ve diğer benzer ortamlardaki tepkileri matematiksel modeller aracılığıyla tahmin edilebilir bir hale gelmektedir (Van Impe ve ark. 2005). Tahmine dayalı mikrobiyoloji, iç ve dış faktörlerin (yani sıcaklık, pH, su aktivitesi, otokton mikrobiyota ve doğal antimikrobiyal bileşikler) mikrobiyal davranış üzerindeki etkisini ölçmek için matematiksel modeller kullanılmaktadır. Tahmine dayalı modeller sayesinde büyüme, inaktivasyon parametreleri ve toksin üretimi tahmin edilebilmektedir (Stavropoulou ve Bezirtoglou, 2019; Schlundt ve ark. 2020) Modellerin sağladığı yanıtlar, gıda işletmelerini ve düzenleyici kurumları veriye dayalı karar verme konusunda destekleyebileceği düşünülmektedir.

Tahmine dayalı mikrobiyoloji, mikrobiyolojik bir sürecin gerçekliğini matematiksel olarak temsil etmeyi ve çevresel faktörlerin etkilerini ölçmeyi amaçlamaktadır (Valdramidis 2016). Tahmine dayalı mikrobiyoloji, mikrobiyoloji, istatistik, matematik ve hesaplama dahil olmak üzere farklı bilim alanlarının etkileşimiyle ortaya çıkmıştır (Perez-Rodriguez ve Valero, 2013). Her gıda türü için bireysel faktörlerin önemi nedeniyle, tahmine yönelik mikrobiyolojik modeller için veri toplama esas olarak laboratuvar verilerine dayanmaktadır. Bununla birlikte, tahminsel mikrobiyoloji için veri oluşturmak amacıyla kasıtlı olarak kontamine olmuş gıdalara odaklanan araştırmaların sayısı da giderek artmaktadır (Stavropoulou ve Bezirtoglou, 2019).

Gıda zinciri boyunca gıda kalitesini ve güvenliğini korumanın zorlukları göz önüne alındığında, gıda endüstrisinde tahmine dayalı modellemenin uygulanması mümkündür (Ross ve ark. 2014). Bu nedenle, tüm sürecin planlanması ve mikroorganizmanın o ortamındaki davranışını yeterince yeniden üreten mikrobiyolojik verilerin toplanması ve çalışmalara dayanan uygun modelin seçilmesi gerekmektedir (Pla ve ark. 2015). Tahmine dayalı modellerin uygulanması, raf ömrü çalışmalarına yardımcı olabilecek ve gıda

ürünlerinin güvenlik ve kalite perspektifine dayalı olarak tasarlanmasına veya yeniden formüle edilmesine, kalite ve gıda güvenliğine yönelik devam eden ihtiyaçların karşılanmasına yardımcı olabilecek bilime dayalı bir araç olarak hizmet vermektedir (King ve ark., 2017). Tahmine dayalı mikrobiyoloji uygulamaları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Tahminsel mikrobiyolojinin uygulama alanları

Tahmine dayalı modeller, çevresel faktörlerin gıdanın kalitesi ve güvenliği üzerindeki etkisinin niceliksel bir görünümünü sağlamaktadır (Perez-Rodriguez ve Valero, 2013).

Örneğin, kantitatif mikrobiyal risk değerlendirmesinde, tahminsel modeller, gıda zinciri boyunca proses basamakların mikrobiyal gelişim üzerindeki etkisini tahmin edebilir ve kontamine gıda tüketimiyle ilişkili riskleri ortaya koyabilmektedir (Membré ve Boué, 2018). Ayrıca, modellerle yapılan tahminler, süreç kriterlerini ve kontrol sınırlarını belirlemek için tehlike ana-

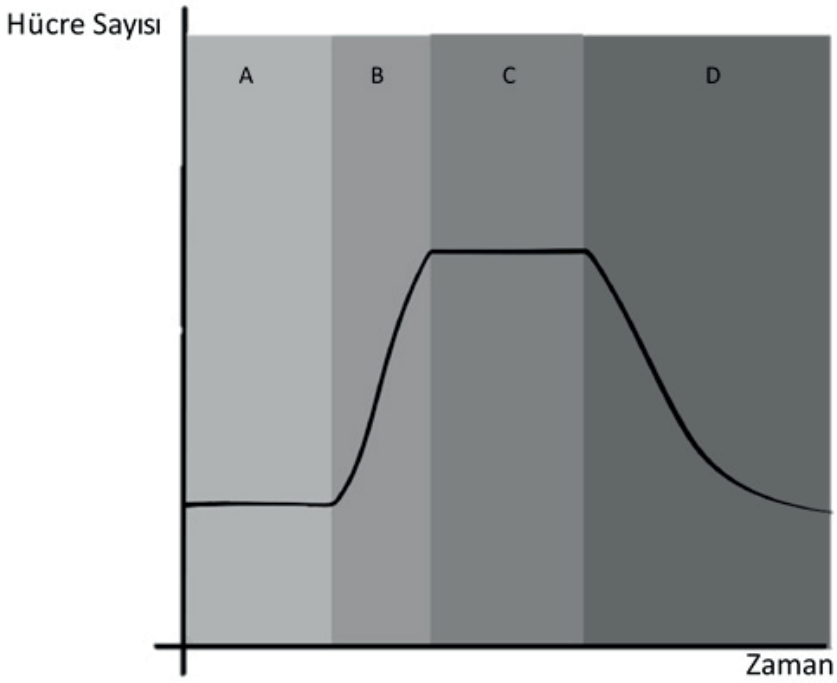
lizi ve kritik kontrol noktaları (HACCP) gibi öz kontrol sistemlerine entegrasyonunu vurgulayarak karar verme süreçlerini olumlu etkilemektedir (Elliott, 1996). Tahmine dayalı mikrobiyoloji ayrıca, mikrobiyal inaktivasyona karşı zamanın etkisinin belirlenmesinde ve termal ve termal olmayan gıda işleme teknolojilerinin mikroorganizma davranışı üzerine etkisi optimize edebilmekte ve doğruyabilmektedir (Alvarenga ve ark. 2022). Bu nedenle tahmine dayalı mikrobiyoloji, gıda kalitesi ve güvenliğine ilişkin karar vermede önemli bir araçtır.

Bu bölümde, gıda matrislerinin özelliklerini, gıdalar ve mikroorganizmalar arasındaki ilişkiyi ve tahmin modelleri üzerinde durulmuştur. Mikrobiyal davranışları ve çevre koşullarının etkisinin anlaşılması ayrıca tahmine dayalı gıda modellemesine dayalı yapılan çalışmalardan özetler derlenmiştir.

Mikrobiyal gelişim kinetiği

Logaritmik ölçek, mikrobiyal büyümeyi temsil etmek ve popülasyonları grafiksel olarak ifade etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir gelişim eğrisi sayesinde mikrobiyal büyüme aşamaları daha iyi görselleştirilmekte ve anlaşılmaktadır Mikrobiyal büyüme, ikili bölünme, tomurcuklanma, spor oluşumu veya parçalanma gibi süreçler yoluyla hücre sayısının arttırılmasını ifade etmektedir. Bu büyüme, bir hücrenin bölünmesi veya bir popülasyonun kendini ikiye katlaması için gereken süreye nesil (jenerasyon) süresi denilmektedir. Gelişim fazlar arasındaki farklılıklar ve nesil zamanı ile mikrobiyal büyüme aşamaları arasındaki ilişkinin anlaşılması çok önemlidir (Horváth, 1976). Peleg ve Corradini'nin (2011) Şekil 1'de gösterdiği gibi mikrobiyal büyüme dört aşamada meydana gelir.

Şekil 1: Mikrobiyal gelişim kinetiği



A) *Geçikme aşaması*: Bu aşama, hücrelerin gizli bir büyüme durumunda olduğu ve üstel büyümeye başlamadan önce metabolizmayı ayarladığı bazen saat, bazen ise birkaç gün sürebilir. Bu aşamada hücre bölünmesi çok az olur veya hiç olmaz, bu da hücre sayısında önemli bir artışa neden olmaz.

B) *Log fazı* veya *üstel büyüme* fazı: Latent durumun sona ermesinin ardından, artan metabolik aktivite fazı başlar. Bu aşamada hücreler logaritmik hücre bölünmesine uğrar ve nesil süresi sabit hale gelir. Çevresel koşullar bu aşamayı etkiler.

C) *Durağan aşama*: Bu aşama, hücre ölümü sayısının yeni hücre sayısına eşit olduğu ve metabolik aktivitenin azaldığı bir denge dönemine karşılık gelir.

D)*Ölüm aşaması*: Bu aşamada, ölü hücrelerin sayısı yeni hücrelerin sayısını aşar ve bu eğilim, yalnızca küçük bir hücre fraksiyonu kalana veya hiç hücre bulunmayana kadar devam edebilir. Yeni ürünler geliştirmeye yönelik süreçleri analiz ederken veya mikrobiyal kontrol yöntemlerinin etkinliğini değerlendirirken farklı mikrobiyal büyüme aşamalarını gözlemlemek önemlidir. Bu, çevresel faktörlerin ve süreç koşullarının mikrobiyal davranış üzerindeki etkisini tahmin etmek için öngörücü modellerin kullanılmasına yardımcı olabilir (Valdramidis 2016).

Mikrobiyal Büyüme Parametreleri

Gıdalarda mikrobiyal büyüme modellerinin kullanımına ilişkin literatürün çoğu, üç büyüme parametresi, bunların nasıl tanımlandığı veya belirlendiği ve büyüklüklerini neyin etkilediğiyle ilişkilidir. Bunlar: "gecikme süresi" (λ), "maksimum spesifik büyüme oranı" (μmax) ve "maksimum büyüme düzeyi" (Nmax) olarak ifade edilmektedir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, bu üçünün açık sezgisel anlamı vardır ve bunların yararlılığı her yerdeki gıda mikrobiyologları tarafından doğal karşılanmıştır. Ancak Gıda Mikrobiyolojisi alanında neredeyse evrensel kabul görmelerine rağmen, yararları ve sınırlamaları, yeni bir bakışı ve daha önceki birçok incelemede kendilerine verilenden daha eleştirel bir yaklaşıma gerek duyulmaktadır. Büyümenin modellenmesi

Mikrobiyal Büyümenin Modellenmesi

Yukarıdakiler göz önüne alındığında, bakteri davranışını ölçmek için birincil, ikincil ve üçüncül modeller olarak üç seviyeli bir sınıflandırma şeması önerilmiştir. (Gibson ve ark. 1997)

Birincil modeller, bakterilerin zaman içindeki davranışını gelişim ve inaktivasyon modellere göre irdelemektedirler. Mikrobiyal büyüme verilerine uyan en yaygın fonksiyonlardan birisi sigmoidal fonksiyonlardır. Sigmoidal fonksiyonlar, mikrobiyal büyüme eğrisinde olduğu gibi dört ayrı aşamadan oluşur (Stavropoulou ve Bezirtoglou, 2019). Birincil modele uygun modellemeler ise olarak Gompertz fonksiyonu, Logistik model, Monod modeli, Richards ve Baranyi modelidir (Çetin ve Yılmaz, 2022). Birincil modellere ait formüller ve parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Birincil model fonksiyonları

Model	Formülü	Parametreleri
Logistik büyüme modeli	$N(t) = \frac{K}{1 + \frac{K - N_0}{N_0} e^{-rt}}$	N(t): t zamandaki popülasyonu temsil eder. N_0: Başlangıç popülasyonunu temsil eder. K: Popülasyonun ulaşabileceği maksimum değer. r: Büyüme hızını temsil eder.
Gompertz fonksiyonu	$N(t) = N_0 \cdot e^{-e^{-(a(t-t_0)}}$	N(t): t zamandaki popülasyonu temsil eder. N_0: Başlangıç popülasyonunu temsil eder. t_0: popülasyonun hızlı büyümeye başladığı zamanı temsil eder. a: büyüme hızını kontrol eden bir parametredir.

Monod büyüme modeli	$\mu = \mu max \frac{S}{K_s + S}$	μ: Mikroorganizmanın özgül büyüme hızını temsil eder. μmax: Maksimum özgül büyüme hızını temsil eder S:Ortamdaki besin konsantrasyonunu temsil eder K_s: Yarı doygunluk sabitini temsil eder
Richards Modeli	$N(t) = (\frac{N_{max}}{1 + \left(\frac{N_{max}}{N_0} - 1\right) e^{-rt}})^{\frac{1}{1-c}}$	N(t): t zamandaki popülasyonu temsil eder. N_0: Başlangıç popülasyonunu temsil eder. Nmax: Maksimum popülasyonunu temsil eder. c: Popülasyonun ulaşabileceği maksimum değer. r: Büyüme hızını temsil eder.
Baranyi Modeli	$N(t) = N_0 + \mu \ln (1 + \frac{e^{\frac{N_{max} - N_0}{\mu}} - 1}{e^{\mu t}})$	N(t): t zamandaki popülasyonu temsil eder. N_0: Başlangıç popülasyonunu temsil eder. Nmax: Maksimum popülasyonunu temsil eder μ: Mikroorganizmanın özgül büyüme hızını temsil eder.

İkincil modeller, kinetik parametreleri değiştiren birincil modellerin faktörlerini kontrol eder (örneğin, bir veya daha fazla çevresel veya fizikokimyasal faktöre göre gecikme aşamasının ve büyüme oranının modellenmesi) (Baranyi ve Roberts, 1995; Koutroumanidis ve ark. 2005). Başka bir ifadeyle, ikincil modeller sıcaklık, su aktivitesi, pH ve diğer faktörler gibi mikrobiyal kinetiği değiştirebilen biyotik ve abiyotik parametreleri kontrol etmektedir (Wijtzes ve ark. 2001). Bu model Ratkowsky modeli ve Arrhenius eşitliği modelini içermektedir (Çetin ve Yılmaz, 2022). İkincil modellere ait formüller ve parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: İkincil model fonksiyonları

Model	Formülü	Parametreleri
Ratkowsky mikrobiyal gelişim modeli	$\mu(t) = \mu_{max} \cdot (\frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}}) \cdot (\frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}})$	μ (t): t zamandaki özgül büyüme hızını temsil eder. μ_{max}: Maksimum özgül büyüme hızını temsil eder. T_{max}: Maksimum sıcaklık değerini temsil eder. T_{min}: Minimum sıcaklık değerini temsil eder. T_{opt}: Optimum sıcaklık değerini temsil eder.

Arrhenius eşitliği	$\mu\,(t) = \mu_{ref} \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$	μ (t): t zamandaki özgül büyüme hızını temsil eder. μ_{ref}: Referans özgül büyüme hızını temsil eder. E_a: Aktivasyon enerjisini temsil eder. R: Evrensel gaz sabitini temsil eder. T: Mutlak sıcaklığı temsil eder.

Son olarak üçüncül modeller, değişen koşulları hesaplamak için algoritmalar dahil ederek tahminler sağlamaya yönelik bir veya daha fazla ikincil modelin uygulamalarıdır. Bu modeller, gıda endüstrisinde ve araştırmalarda yaygın olarak kullanılan birincil ve ikincil modelleri birleştirmeye yönelik bilgisayar araçlarıdır (Stavropoulou ve Bezirtoglou, 2019).

GlnaFit, Food Spoilage and Safety Predictor (FSSPTM), Pathogen Modelling Program (PMP), Growth Predictor, Food MicroModel, Pseudomonas Predictor, Seafood Spoilage Predictor (SSP), ComBase ve DMFit uygulamaları ise üçüncül modellere örnek verilebilir (Çetin ve Yılmaz, 2022).

Gıda Bilimi ve Endüstrisi açısından önemi

Giannuzzi ve ark. (1999) pH ve potasyum sorbatın *S. aureus* büyümesi üzerine etkileri üzerine yapılan bir çalışmada Gompertz modeli kullanılarak R^2 değerleri 0,837 ile 0,939 arasında bulunmuştur. Zurera-Cosano ve ark. (2004), farklı gelişme koşullarının *S. aureus* gelişimi üzerindeki etkilesini araştırdıkları bir çalışmada, yanıt yüzey yöntemi kullanıldığı modelde R^2 değerlerinin 0,77 ile 0,98 arasında değiştiğini, Davey modelinde ise 0,93 ile 0,98 arasında olduğunu ifade etmişlerdir.

Pérez-Rodriguez ve ark. (2007) pişirilmiş et ürünlerinde *S. aureus* gelişiminin doğrusal model ve Weibull modelini kullanmış ve R^2 değerlerinin sırasıyla 0,86 ile 0,95 ve 0,88 ile 0,97 arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Ding ve ark. (2011) *S. aureus*'un Kimbab'daki gelişim verilerini modifiye Gompertz modeli ve lojistik modellerden yararlanarak incelemiş ve R2 değerlerinin 0,9740 ile 0,9975 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Kalkan (2020) beyaz peynirde *S. aureus* gelişmini modellediği bir çalışmada, Fourier modelleme yöntemi kullanılarak R^2 değerlerinin 0,9847 ile 0,9986 arasında değiştiğini bulmuştur. Vakumlu ve aerobik koşullarda depolanan su ürünlerinde *Listeria monocytogenes*'in gelişim kinetiğinin araştırıldığı bir çalışmada, *L. monocytogenes*'in gelişiminin değerlendirilmesi için Ratkowsky ve Baranyi modellerini kullanılmıştır. Araştırmacılar geliştirilen modeller ile balıkçılık ürünlerinde *L. monocytogenes* için güvenli tahminler sağladığını ifade etmişlerdir (Araceli Bolívar ve ark. 2018).

Yeşil sofralık zeytin fermantasyonu sırasında *Escherichia coli* O157:H7'nin mikrobiyal inaktivasyonunun modellendiği bir çalışmada, araştırmacılar fer-

mantasyon sırasında stresli koşullarda starter kültürlerden yüksek düzeyde laktik asit üretimi sayesinde *E. coli* O157:H7'nin inaktive olduğu ve geliştirilen modelde pH, karbon kaynağı ve laktik asit gibi bir çok faktörü içerdiğini ifade etmişlerdir (Skandamis ve ark. 2003). Zeytin fermantasyonunda *Pichia anomala*'nın gelişminin modellendiği bir çalışmada, araştırmacılar modifiye Gompertz, modifiye lojistik, modifiye Richards-Stannard ve Baranyi-Roberts modeli olmak üzere 4 modeli kullanmışlardır. *P. anomala*'nın gelişimi bütün modellere iyi uyum sağlamasına rağmen, en uygun modellerin modifiye Gompertz ve Richards-Stannard modelleri olduğu ifade edilmiştir (Arroyo ve ark. 2005).

Modelleme çalışmalarında büyük ve küçük populasyonlarda bazı farklılıkların ortaya konduğu bir çalışmada, *Salmonella* Enterica serotipi Agona'nın inaktivasyonunu inceleyerek, kinetik modellerin yalnızca büyük popülasyonlar için geçerli olduğu, küçük popülasyonlarda D değerinin popülasyonun hücre heterojenliği nedeniyle yüksek değişkenlik gösterdiği ayrıca araştırmacılar , karışık mikrobiyal popülasyonların inaktivasyonundaki değişkenlik gösterdiğini ifade etmişlerdir (Aspridou ve ark. 2014). Darbeli ışık teknolojisi (PL) ile muamele edilen *Bacillus cereus* sporlarının kinetiği üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, araştırmacılar PL *B. cereus* sporlarının gelişim parametrelerini etkilediği ve özellikle özgül gelişim hızını hızlıca düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, PL işlemine tabi tutulan gıdaların, diğer termal veya ışınlama prosedürlerine tabi tutulan gıdalardan daha uzun saklama kapasitesine (raf ömrüne) sahip olduğunu ifade etmişlerdir (Aguirre ve ark., 2015). Benzer şekilde Külcü ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada tavuk kıymalarını sarımsak ekstraktı ile muamele etmiş ve mikrobiyolojik parametreleri polinom yüzey uydurma (PSF) yöntemi ve yapay sinir ağları (YSA) modelleme yöntemini kullanarak modellemişlerdir. Araştırmacılar sarımsak ekstraktının çiğ tavuk kıymasında mikrobiyal gelişimin engellenmesinde modellenebilir etkilere sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Modellerin uyumu %97 ile %99 arasında değişmektedir. YSA %1-1,5 oranında daha iyi uyum sağlamasına rağmen YSA'nın dezavantajları nedeniyle her iki modelin bir arada kullanılması önerilmiştir.

Öztürk ve arkadaşları (2020) tarafından yürütülen farklı bir çalışmada, enginar yaprağı ekstraktının +4°C'de muhafaza edilen sardalya köftelerine mikrobiyolojik ve kimyasal etkileri incelenmiştir. Enginar yaprağı ekstraktının balık köfteleri üzerindeki mikrobiyolojik ve kimyasal etkileri doğrusal olmayan bir regresyon modeli kullanıldığı ve ölçülen parametrelerin R^2 değerlerinin 0,845 ile 0,958 arasında değiştiği ve model uyumluluğunu yüksek olduğunu ifade edilmiştir. Benzer bir başka çalışmada, Menezes ve ark. (2018) Baranyi ve Roberts modeli için kontrol dilimlenmiş salam için ortalama R^2 değerinin 0,979 olduğunu ve %0,4 kekik esansiyel yağı içeren salam örnekleri için 0,941 olduğunu bulmuşlardır. Aynı çalışmada, araştırmacılar modifiye

Gompertz için kontrol salam numuneleri için ortalama R^2 değeri 0,975, %0,4 kekik esansiyel yağı içeren salam numuneleri için ise 0,950 bulmuşlardır.

Sonuç

Var olan büyüme modelleri, farklı değerlendirmeleri ve varsayımları temel alarak geliştirilmiştir. Bu farklılıklar, matematiksel ifadelerini ve sahip oldukları parametre sayısını etkilemektedir. Pratikte, neredeyse her zaman aynı deneysel büyüme verileri, birden fazla model türü tarafından tanımlanabilir ve hatta tahmin edilebilir. Bu durum, bir büyüme modelinin benzersiz olması gerekliliğinin olmadığını gösterir.

Mikrobiyal büyüme eğrisinin şekli, bireysel hücrelerin içindeki ve dışındaki biyokimyasal ve biyofiziksel süreçler tarafından düzenlenen hücresel düzeydeki olayların bir yansımasıdır. Ancak büyüme eğrisinin şekli, göreceli katkılarını niceliksel olarak değerlendirmeyi zorlaştırır ve hepsini tanımlamaya yetecek kadar bilgi içermez. Bu nedenle, bir kinetik büyüme modelinin bir parametresinin veya parametre kümesinin, hücrelerin "fizyolojik durumunun" özel bir temsilcisi olduğu fikri, bağımsız kanıtlarla desteklenmelidir. Aksi takdirde, büyüme eğrisinin şekline veya herhangi bir parçasına ilişkin neredeyse her zaman alternatif bir açıklama bulunabilir. Tercihen, bir modelin mekanik yorumunun bağımsız olarak doğrulanması, özellikle onu doğrulamak veya çürütmek için tasarlanmış deneylerden gelmelidir.

Böyle bir deneysel doğrulama sunulana kadar, belirli bir kinetik modelin diğerlerinden daha "temel" veya "mekanistik" olduğu iddiası sürdürülemez. Baranyi-Roberts modeli de dahil olmak üzere tüm lojistik (Verhulst) modelinin varyantları, popülasyon büyüklüğü hala büyürken bazı hücrelerin ölebileceği olasılığını hesaba katmaz. Dolayısıyla bunlar, tek başına gerçek anlamda "temel" sayılamaz.

Teorik olarak, "gecikme süresi" ve "sabit faz" sırasında ölen hücrelerin sayısı, bir hücrenin bölünmemesi veya ölmemesi olasılığını da içeren, bölünmeyle eklenen sayıya eşit olmalıdır. Ancak modeller, bize bölünme ve ölüm oranları hakkında bilgi veremez. Benzer şekilde, "üstel aşama"daki büyüme oranındaki bir değişiklik, örneğin, artan veya azalan bölünme oranının tek başına bir sonucu olabilir veya buna düşen veya artan bir ölüm oranının eşlik etmesi de mümkündür. Gerçekte ne olduğu, değişen anlık hücre bölünmesi ve ölüm oranlarının ne olduğu, yalnızca büyümeye dayalı herhangi bir kinetik model tarafından açıklanmaz.

Eğer bir kinetik model öncelikli olarak öngörme kabiliyetine göre değerlendirilirse, mevcut büyüme modellerinden hiçbiri, aksini iddia eden iddialara rağmen, doğası gereği üstün değildir.

Sonuç olarak, bir büyüme modeli seçimi yalnızca matematiksel basitlik ve sezgisel anlam taşıyan parametrelere dayanmalıdır. Yarı kimyasal ve olasılıksal modeller, hücresel düzeydeki olayları popülasyon düzeyinde belirlemek için iki farklı yol sunar. Ancak bunlar da deneysel olarak henüz doğrulanmamış varsayımlara dayanmaktadır.

Bu alandaki araştırmacılara yönelik iki önemli zorluk, sıcaklık, pH, aw ve diğer faktörlerin eş zamanlı olarak değiştiği dinamik büyümeyi tahmin etmek için pratik modeller geliştirmek ve doğrulamaktır; bunları başarılı bir şekilde heterojen habitatlardaki mikrobiyal büyümeye uygulamak da önemlidir. Aynı zamanda, ısı ve kütle transferlerinin de rol oynadığı durumlarda bu modelleri etkili bir şekilde kullanabilmektir.

KAYNAKLAR

Aguirre, J. S., de Fernando, G. G., & Hierro, E. Hospital, XF, Ordóñez, JA, and Fernández, M.(2015). Estimation of the growth kinetic parameters of Bacillus cereus spores as affected by pulsed light treatment. *Int. J. Food Microbiol*, *202*, 20-26.

Alvarenga, V. O., Brito, L. M., & Lacerda, I. C. A. (2022). Application of mathematical models to validate emerging processing technologies in food. *Current Opinion in Food Science*, *48*, 100928.

Arroyo, F. N., Quintana, M. D., & Fernández, A. G. (2005). Evaluation of primary models to describe the growth of Pichia anomala and study of temperature, NaCl, and pH effects on its biological parameters by response surface methodology. *Journal of food protection*, *68*(3), 562-570.

Aspridou, Z., & Koutsoumanis, K. P. (2015). Individual cell heterogeneity as variability source in population dynamics of microbial inactivation. *Food microbiology*, *45*, 216-221.

Baranyi, J., & Roberts, T. A. (1995). Mathematics of predictive food microbiology. *International journal of food microbiology*, *26*(2), 199-218.

Bolívar, A., Costa, J. C. C. P., Posada-Izquierdo, G. D., Valero, A., Zurera, G., & Pérez-Rodríguez, F. (2018). Modelling the growth of Listeria monocytogenes in Mediterranean fish species from aquaculture production. *International journal of food microbiology*, *270*, 14-21.

Çetin, C., & Yılmaz, S. Ö. (2022). Prediktif modellemelerin gıdalarla ilgili mikrobiyal çalışmalarda kullanımı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *11*(3), 626-634.

Ding, T., Shim, Y. H., Kim, H. N., Ha, S. D., Chung, M. S., Hwang, I. G., & Oh, D. H. (2011). Development of predictive model for the growth of Staphylococcus aureus in Kimbab. *Food Science and Biotechnology*, *20*, 471-476.

Dorota, Z., Danuta, K. K., Antoni, G., & Motyl, I. (2014). Predictive modelling of Lactobacillus casei KN291 survival in fermented soy beverage. *Journal of Microbiology*, *52*, 169-178.

Elliott, P. H. (1996). Predictive microbiology and HACCP. *Journal of food Protection*, *59*(13), 48-53.

Giannuzzi, L., Contreras, E., & Zaritzky, N. (1999). Modeling the aerobic growth and decline of Staphylococcus aureus as affected by pH and potassium sorbate concentration. *Journal of food protection*, *62*(4), 356-362.

Gibson, A. W., Wojciechowicz, L. A., Danzi, S. E., Zhang, B., Kim, J. H., Hu, Z., & Michels, C. A. (1997). Constitutive mutations of the Saccharomyces cerevisiae MAL-activator genes MAL23, MAL43, MAL63, and mal64. *Genetics*, *146*(4), 1287-1298.

Horváth, S. (1970). Importance of the generation time in microbiological experi-

ments. *Folia Microbiologica*, *15*, 259-266.

Kalkan, S. (2020). Predicting the antimicrobial effect of probiotic lactic acid bacteria against Staphylococcus aureus in white cheeses, using Fourier series modeling method. *Journal of Food Safety*, *40*(1), e12724.

King, T., Cole, M., Farber, J. M., Eisenbrand, G., Zabaras, D., Fox, E. M., & Hill, J. P. (2017). Food safety for food security: Relationship between global megatrends and developments in food safety. *Trends in Food Science & Technology*, *68*, 160-175.

Koutroumanidis, T., Iliadis, L., & Sylaios, G. K. (2006). Time-series modeling of fishery landings using ARIMA models and Fuzzy Expected Intervals software. *Environmental Modelling & Software*, *21*(12), 1711-1721.

Külcü, D. B., Kalkan, S., & Akben, S. B. (2019). Polynomial surface fitting and artificial neural networks-based analysis of the storage days and garlic extract supplementation dependent microbial growths in minced raw chicken meat. *Journal of Food Processing and Preservation*, *43*(3), e13882.

Membré, J. M., & Boué, G. (2018). Quantitative microbiological risk assessment in food industry: Theory and practical application. *Food Research International*, *106*, 1132-1139.

Menezes, N. M. C., Martins, W. F., Longhi, D. A., & de Aragão, G. M. F. (2018). Modeling the effect of oregano essential oil on shelf-life extension of vacuum-packed cooked sliced ham. *Meat science*, *139*, 113-119.

Njage, P. M. K., Sawe, C. T., Onyango, C. M., Habib, I., Njagi, E. N., Aerts, M., & Molenberghs, G. (2017). Microbial performance of food safety control and assurance activities in a fresh produce processing sector measured using a microbial assessment scheme and statistical modeling. *Journal of food protection*, *80*(1), 177-188.

Ozturk, F., Kalkan, S., Tirali, T., & Gunduz, H. (2020). The effects of artichoke (Cynara scolymus L.) Leaf extract on the microbial and chemical quality of Sardine (Sardina pilchardus Walbaum, 1792) fish patties and shelf life modeling. *Journal Of Food Safety And Food Qualıty-Archıv Fur Lebensmıttelhygıene*, *71*(2), 50-57.

Peleg, M., & Corradini, M. G. (2011). Microbial growth curves: what the models tell us and what they cannot. *Critical reviews in food science and nutrition*, *51*(10), 917-945.

Perez-Rodriguez, F., Valero, A., Pérez-Rodríguez, F., & Valero, A. (2013). *Predictive microbiology in foods* (pp. 1-10). Springer New York.

Pérez-Rodríguez, F., Valero, A., Todd, E. C. D., Carrasco, E., García-Gimeno, R. M., & Zurera, G. (2007). Modeling transfer of Escherichia coli O157: H7 and Staphylococcus aureus during slicing of a cooked meat product. *Meat Science*, *76*(4), 692-699.

Pla, M. L., Oltra, S., Esteban, M. D., Andreu, S., & Palop, A. (2015). Comparison of primary models to predict microbial growth by the plate count and absorbance

methods. *BioMed research international*, *2015*..

Ross, T., McMeekin, T.A., Baranyi, J. (2014). Predictive microbiology and food safety. In Encyclopedia of food microbiology, 2nd edn. Elsevier, pp 59–68

Ross, T., & McMeekin, T. A. (1994). Predictive microbiology. *International journal of food microbiology*, *23*(3-4), 241-264.

Schlundt, J., Tay, M.Y.F., Chengcheng, H., Liwei, C. (2020). Food security: microbiological and chemical risks. In: Masys AJ, Izurieta R, Reina Ortiz M (eds) Global health security. Advanced sciences and technologies for security applications. Springer, Cham, pp 231–274

Skandamis, P. N., & Nychas, G. J. (2003). Modeling the microbial interaction and the death of Escherichia coli O157: H7 during the fermentation of Spanish-style green table olives. *Journal of Food protection*, *66*(7), 1166-1175.

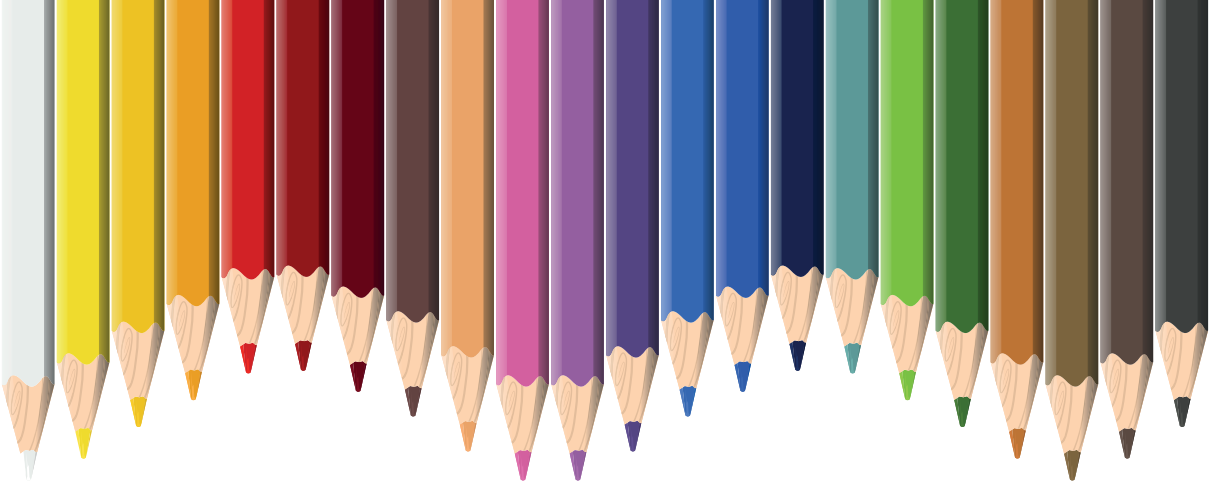
Stavropoulou, E., & Bezirtzoglou, E. (2019). Predictive modeling of microbial behavior in food. *Foods*, *8*(12), 654.

Valdramidis, V. (2016) Predictive microbiology. In: Modeling in food microbiology. Elsevier, pp 1–15

Van Impe, J. F., Poschet, F., Geeraerd, A. H., & Vereecken, K. M. (2005). Towards a novel class of predictive microbial growth models. *International Journal of Food Microbiology*, *100*(1-3), 97-105.

Wijtzes, T., Rombouts, F. M., Kant-Muermans, M. L. T., Van't Riet, K., & Zwietering, M. H. (2001). Development and validation of a combined temperature, water activity, pH model for bacterial growth rate of Lactobacillus curvatus. *International journal of food microbiology*, *63*(1-2), 57-64.

Zurera-Cosano, G., Castillejo-Rodriguez, A. M., Garcia-Gimeno, R. M., & Rincon-Leon, F. (2004). Performance of response surface and Davey model for prediction of Staphylococcus aureus growth parameters under different experimental conditions. *Journal of food protection*, *67*(6), 1138-1145.



Bölüm 26

GIDALARDA DOĞAL OLARAK BULUNAN VEYA BULAŞAN TOKSİK MADDELERİN SAĞLIK ÜZERİNE ETKİLERİ

Arzu KAVAZ YÜKSEL[1]
Mehmet YÜKSEL[2]

1 Atatürk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Erzurum, Türkiye, ORCID no: 0000-0001-8292-9259, Prof. Dr.
2 Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye, ORCID no: 0000-0001-6566-1385, Dr. Öğr. Üyesi
*Sorumlu Yazar: arzu-kavaz23@hotmail.com; arzukavaz@atauni.edu.tr

GİRİŞ

Ağız, solunum ve deri yoluyla vücuda belli bir dozda veya belli bir zaman aralığında alındığında biyolojik sistemlere zarar veren maddelere toksin adı verilmektedir. Gıdalarda bulunan toksik maddeler, gıdaların yapısında doğal olarak bulunabileceği gibi gıdanın üretiminden tüketimine kadar her aşamada oluşabilmekte veya çeşitli aşamalarda katılan katkı maddeleri veya gıdalara çeşitli şekillerde kontamine olan maddelerden kaynaklanabilmektedir (Anonymous, 1975).

Genel olarak sağlıklı olduğu düşünülen pek çok gıda, uzun süre ve sık aralıklarla tüketildiğinde insan ve hayvan metabolizmasında istenmeyen etkilere neden olan doğal kimyasal maddeler ihtiva etmektedir. Doğal toksinler, canlı organizmalar tarafından üretilen, genellikle organizmaların kendilerine zarar vermeyen ancak insan veya hayvan sağlığını etkileyebilen zehirli ikincil metabolitlerdir (WHO, 2020; Dolan et al., 2010). Bu tür toksinlerin yaygın kaynakları arasında zehirli bitkiler, mantarlar, algler, bakteriler ve deniz biyotoksinleri yer almaktadır (FAO, 2019).

Gıdaların mikrobiyolojik kontaminasyonu, gıdanın bakteri üremesi veya içinde bulunan toksik maddeler nedeniyle bozulması olarak tanımlanmaktadır. Basit bir ifadeyle, gıdanın güvenliğini veya kalitesini azaltan gıdanın içindeki her türlü madde, gıda kontaminantı olarak kabul edilmektedir. Gıda kontaminasyonu bulaşma yoluyla, kasıtlı ve hatta doğal yollarla olabilmektedir. Kontaminasyon, bakteriler, mayalar ve küfler tarafından üretilen mikrobiyal toksinlerden kaynaklanabilmektedir (Das et al., 2019) ve kontaminasyon, gıda üretimin herhangi bir aşamasında meydana gelebilmektedir (Das et al., 2019; Ajaykumar and Mandal, 2020). Gıda güvenliği için çeşitli çabalar sarf edilmesine rağmen, gıda kaynaklı hastalıklar hala önemli bir gıda güvenliği sorunudur; çünkü mikroorganizmalar veya bunların ürettikleri toksinler ciddi hastalıklara ve hatta ölümlere yol açabilmektedir (Baluka et al., 2015). *Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Bacillus cereus, Pseudomonas, Coliforms, Salmonella* spp., Listeria spp., Shigella spp., Clostridium spp., Yersinia spp., vb. gibi bakteriler gıdayı kontamine edebilmektedir.

Gıdaların, mikroorganizmalarla kontaminasyonunun yanısıra başka etkenler de kontamine olabilmektedir. Toksinler, ağır metaller vb. gibi bazı kimyasallar da gıda üretiminin çiftlikten sofraya kadar olan herhangi bir aşamasında gıdaya bulaşabilmekte ve sağlık açısından risk oluşturabilmektedir. Özellikle, Gıdanın işlenmesi, paketlenmesi, taşınması ve depolanması gibi çeşitli aşamaların herhangi bir noktasında kimyasal toksik maddelerle bulaşma meydana gelebilir (Rather et al., 2017). Bu nedenle, gıda üretimindeki her basamak oldukça önemlidir ve kontaminasyona karşı oldukça hassastır. Sağlığımızın en temel belirleyicilerinden biri yediğimiz gıdalardır. Her ne kadar çalışmalar, mikrobiyolojik gıda kaynaklı patojenlerle ilişkili akut hastalıkla-

ra odaklanılsa da, kimyasal kirleticilerle ilişkili riskler ciddi şekilde dikkate alınmalıdır (Gibb et al., 2019) Kimyasal kontaminasyon, özellikle toksik metaller, poliklorlu bifeniller ve dioksinlerlerle olduğu gibi çevresel kirlenmenin bir sonucu olarak veya pestisitler, veteriner tıbbi ürünler ve gıdayla temas eden malzemeler gibi kimyasalların kasıtlı kullanımı sonucunda da meydana gelebilmektedir (Rather et al., 2017)

Gıdalara bulaşan kimyasal kontaminantlardan kaynaklı hastalıkların yükünü tahmin etmek, oldukça zordur. Özellikle, ilk olarak gıda tedarikinde kadar kimyasalın ve toksinin girdiğini ve tedarik zincirinin hangi noktasında bulaşmanın olduğunu ölçmek zordur (Gibb et al., 2015). İkincisi, balık toksinleri ve kalıcı organik kirleticiler gibi bazı kimyasalların yükünün belirlenmesi, biyolojik izleme verilerinin tahmin edilmesi ve ilgili toksisite verileriyle birleştirilmesi için epidemiyolojik çalışmalar gerekebilir. Üçüncüsü, karaciğer kanserine neden olan aflatoksin veya böbrek kanserine neden olan kurşun gibi gıdalardaki kimyasalların neden olduğu sağlık etkileri, maruziyetten yıllar sonra gözlemlenemeyebilir ve uzun süreli çalışmalar gerektirebilir; bunlar zaman alıcı ve pahalıdır. Dördüncüsü, sağlık sonuçlarının çok nedenli olması nedeniyle kimyasal maddelere maruz kalma arasındaki ilişkinin kurulması gıdadaki kirletici maddeler ve hastalıkların gelişimi karmaşıktır. Sonuç olarak, etkiye maruz kalmayla (yani doz-yanıt) ilgili veriler genellikle sınırlıdır. Bunun için in vitro veya in vivo çalışmalardan elde edilen verilerin ortaya konulması gereklidir. Aslında tek bir kimyasal birden fazla sağlık etkisi yaratabilir. Örneğin bir kimyasal, üreme sistemini etkilerken kanserojen de olabilir (WHO, 2009). Beşincisi, gıdalardaki kimyasal kontaminantlar, sağlık üzerine olumsuz etkiye neden olacak kadar yüksek doz seviyelerinde maruziyet durumunda insan sağlığına zarar verebilmektedir (WHO, 2009). Ancak bazı kimyasallar için potansiyel bir risk olmadığı sürece maruz kalma düzeyinin belirlenmesi mümkün değildir. Sayılan bu beş zorluk, gıdalardaki kimyasal kirleticilerin oluşturduğu sağlık tehditlerini ölçmeye çalışan mevcut çalışmaları sınırlandırmaktadır (Gibb et al., 2019).

Birçok bitkisel ve hayvansal gıda insanlar için toksin veya anti besin maddesi olarak sınıflandırılan spesifik sekonder metabolitler içermektedir. Bunun yanısıra gıdalara kimyasal birtakım maddelerde bulaşabilmektedir. Tablo 1.'de bu biyoaktif bileşiklerin ana grupları ve bulaşan maddeler gösterilmiştir. Bu maddelerin tüketiciler için oluşturduğu potansiyel risk ve tehlikeler ile ilgili hususlardan aşağıda bahsedilmiştir.

Tablo 1. *Gıdalarda doğal ve bulaşma yoluyla bulunan toksik maddeler*

Gıdalarda doğal olarak bulunan toksinler	Mikrobiyal kaynaklı toksinler	Kimyasal kontaminasyonlar
Bitkisel toksinler	Mikotoksinler	Çevresel kontaminantlar
Mantar toksinleri	Bakteriyal toksinler	Veteriner ilaçları
Hayvansal toksinler		Pestisitler
		Ambalaj malzemesi kaynaklı kontaminantlar
		Deterjan kalıntıları
		Orantısız kullanılan katkı maddeleri
		Pişirme sırasında oluşan toksik maddeler

GIDALARDA BULUNAN DOĞAL TOKSİNLER

Gıda türleri tarafından doğal olarak üretilen ve gıda zehirlenmesine neden olan çok çeşitli doğal toksinler vardır. Bu toksinler gıdalara mikroorganizmalara, böcek ve haşerelere, güçlü güneş ışınlarına ve hava şartlarına karşı bir tür korunma görevi kazandırmaktadır. Doğal toksinler ihtiva eden gıdalara; mantar, kırmızı barbunya fasulyesi, kabak, elma ve şeftali gibi meyvelerin tohumları, patates ve tatlı patates örnek olarak gösterilebilir. Gıda ve yemlerde doğal toksinlerin bulunması, şüphesiz hem bilim adamlarının hem de tüketicilerin endişe duymasına neden olan önemli bir gıda güvenliği konusudur**.** Doğal toksinlerin sınıflandırılmasında güncel terminoloji göz önüne alındığında çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Dar anlamda, doğal toksinler, bitkiler veya hayvanlar tarafından endojen olarak üretilen ve gıdanın kendisi veya ürünü tüketildiğinde olumsuz etkilere yol açabilen gıda bileşenleri olarak tanımlanmaktadır. Doğal toksinlerin daha geniş tanımı ise aynı zamanda gıdanın kirlenmesinden kaynaklanan toksik bileşikleri de içermektedir Bunlar aşağıda verilmiştir. (Van Egmont, 2004).

(i) Toksik metabolitler üreten mikroorganizmalar gıdayı (veya gıda üretimi için kullanılan ham maddeyi) kirletebilir. *Aspergillus*, *Penicillium* ve *Fusarium*'un toksikojenik türleri ve diğer mantar cinsleri tarafından üretilen aflatoksinler, okratoksin A, trikotesen, zearalenon, fumonisinler ve patulin gibi mikotoksinler, her iki türde de büyük endişe kaynağıdır. Bu toksinler (termolabil patulin hariç), gıda ürünlerine veya hayvansal ürünlere bir kez bulaştıktan sonra bunların bilinen gıda işleme uygulamalarıyla ortadan kaldırılması neredeyse imkansızdır (Van Egmont, 2004; Tu and Gaffield, 2000).

(ii) Ayrıca bazı bakteriler de toksin (örneğin Clostridium botulinum'un ürettiği botulin, *Staphylococcus aureus'un* enterotoksini ve yine *Bacillus cereus* tarafından üretilen enterotoksin) üretebilir. Bunların çoğu, mikotoksinlerin aksine ısıya dayanıklı olmayan proteinlerdir ve bu nedenle çoğu durumda kontamine gıdanın ısıl işlemiyle azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir (Van Egmont, 2004; Tu and Gaffield, 2000).

(iii) Dünya genelinde deniz ve tatlı su kütlelerinde zaman zaman oluşan bazı tek hücreli mikroalgler, fitotoksin adı verilen toksinler üretir. Domoik asit, saksitoksin (paralitik kabuklu deniz ürünleri zehirlenmesi veya PSP toksini) ve brevetoksin gibi bazı toksinler, biyolojik olarak birikebildikleri için insan sağlığı açısından önemli sorunlara neden olmaktadır.Bu alglerin, balık ve kabuklu deniz canlılarının besin zincirinde bulunması önemli bir sorundur. Ayrıca, içme sularında siyanobakteriyel toksinlerin (anatoksinler, mikrosistinler ve nodülerler dahil) varlığı, bu bağlamda dikkate alınması gereken başka bir tehlikeyi de ortaya koymaktadır (Van Egmont, 2004; Tu and Gaffield, 2000).

(iv) Bitki kökenli toksik olmayan ham maddeler kazara veya uygun olmayan koşullar nedeniyle bulaşmış veya besin değeri olmayan toksik bitki türleriyle karışmış olabilir; örneğin birkaç toksik glikoalkaloit içeren olgunlaşmamış siyah itüzümü (*Solanum nigrum*) meyveleri yenilebilir nitelikteki ürünlerle karışarak toksik etkinin oluşumuna neden olabilir (Van Egmont, 2004; Tu and Gaffield, 2000).

1. Bitki kaynaklı toksinler

Bitkiler, birincil metabolizmanın ara ürünlerinden farklı çok sayıda kimyasal bileşik içermektedir. Birincil metabolitlerden ve bunların öncüllerinden üretilen ikincil metabolitler, bitkilerin koku, tat ve/veya renkleri gibi çeşitli spesifik özelliklerine katkıda bulunabilmekte; bunlardan bazıları bakteri, mantar, böcek ve/veya otçullara karşı aktif ve güçlü savunma mekanizmalarının temel bileşenleri olarak görev yapmaktadır. Ancak bu bileşenlerin bitki sağlığı ve çoğalmasındaki gerçek işlevi henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Şunu da belirtmek gerekir ki, dünyadaki bitki türlerinin çoğu, çoğu zehirli maddelerin varlığından dolayı insanlar için yenmez niteliktedir; yine de bin yıl boyunca ıslah etme süreci ile kültürel türlerdeki bu maddelerin düzeyleri kademeli olarak azaltılmıştır. Bugün gıda olarak tükettiğimiz bitkilerde yabani akrabalarıyla karşılaştırıldığında sağlık açısından risk oluşturabilecek bileşikler oldukça az oranda bulunmaktadır (D'Mello, 2003; Zhou et al., 2015).

1.a. Siyanojenik glikozitler (Siyanojenler): Pek çok bitki siyanojenik glikozitleri ihtiva etmektedir. Bunlardan bazıları yalnızca taze mahsullerde bulunmakta ve uygun işlemler kullanılarak büyük ölçüde ortadan kaldırılabilmektedir (Davidek, 1995). Endojenik β-glikosidazlar tarafından katalize edilen enzimik parçalanma yoluyla hidrojen siyanürü serbest bırakan a-hidroksinitrillerin (siyanojenik glikozitler) glikozitleri, ekonomik açıdan önem taşıyan birçok bitkide bulunmaktadır. Genel olarak bitkilerde, linamarin, amigdalin ve dhurrin gibi siyanojenik glikozitler tespit edilmiştir. Siyanojenik glikozitler bitkiler içinde yalnızca baklagillerde bulunmamaktadır. Bu glikozitlerden kaynaklanan zehirlenme belirtileri hücrelerin oksijensiz kalması sonucu açığa çıkmaktadır. Bu belirtiler, hızlı solunum, karın ağrısı, uyu-

şukluk hali, baş ağrısı ile bulantı ve kusmadır. Belirtiler, çok hızlı gelişebilmekte ve 20 dakika gibi kısa bir sürede solunum yetersizliği ve ölüme neden olabilmektedir (Vasconcelos and Oliveria, 2004).

1.b. Fitohemaglutininler (Lektinler): Lektinler veya hemaglutininler doğada her yerde bulunan karbonhidrat bağlama özelliğine sahip (gliko)proteinlerdir (Vetter, 2000; Vasconcelos and Oliveria, 2004).Lektin diğer adıyla fitohemaglutininler, T-lenfositlerdeki DNA sentezini baskılanma yeteneğinden dolayı yıllarca immünolojistler tarafından kullanılmıştır. Baklagil türleri en yaygın yenilebilir bitkisel gıdalardır. Hem insanlar ve hem de çiftlik hayvanları tarafından günlük olarak kayda değer miktarlarda tüketilmektedirler. Yüksek stabiliteleri nedeniyle lektinler, tüketicilerin gastrointestinal sistemindeki sindiriminde aktif kalabilmekte ve ciddi mide rahatsızlıklarına neden olabilmektedirler (Vetter, 2000; Vasconcelos and Oliveria, 2004). Bu maddeler, özellikle çeşitli fasülye türleri ile yer fıstığında bulunmaktadır. Ayrıca; mercimek, bakla, bezelye, muz, mango patates, havyar ve bazı mantar türleri lektin içermektedir. Özellikle, kırmızı fasulyede yüksek konsantrasyonlarda lektin bulunması ve bu bitkinin tüketimi sonucu meydana gelen zehirlenme "Kırmızı barbunya zehirlenmesi" olarak adlandırılmıştır (Vasconcelos and Oliveria, 2004). Kırmızı barbunya fasulyesi bezelye ve mercimeği de içine alan bakliyat ailesinin bir üyesidir. Bu fasulye türü sağlıklı ve besleyicidir ancak bunun gıda zehirlenmesine neden olabilme gibi bir dezavantajı bulunmaktadır. Kırmızı barbunya fasulyesin zehirlenmesinin ana nedeni hemaglutinin karakterinde azotlu madde olan 'fitohaemaglutinin' veya diğer bir adıyla lektin adı verilen bir toksindir. Bu maddeler, birçok fasulye türü ve baklada bulunan şeker ihtiva eden bir glikoproteindir. Fakat, bu toksinin en yüksek konsantrasyonları genel olarak kırmızı barbunya fasulyesinde bulunmaktadır ve yeterince yüksek sıcaklıkta ve doğru sürede pişirilirse bu toksin yok edilebilmektedir (Lajolo and Genovese, 2002).

1.c. Proteaz inhibitörleri: Genel olarak sebze ve bitkilerin büyük çoğunluğunda yer alan proteaz inhibitörleri hayvansal dokularda da bulunabilmektedir. Özellikle, bakla, soya fasülyesi ve yeşil fasulye proteaz inhibitörü ihtiva eden bitkisel gıdalar arasında yer almaktadır. Tripsin inhibitörleri, proteaz inhibitörlerinin en yaygını ve üzerinde en çok araştırma yapılanıdır. Tripsin ve/veya kemotripsin inhibitörleri baklagiller ve bunların haricinde kolostrum, sebzeler, tahıllar, beyaz-tatlı patatestes ve, guargumda da tespit edilmiştir. Bu inhibitörler ısıl işlemle birlikte inaktif hale gelmektedir (Burns, 1987; Srikanth and Chen, 2016).

1.d. Latirojenler: Latirizm hastalığına neden olan ve *Lathyrus* cinsindeki bazı bezelyelerde bulunan toksik ögeler latirojenler olarak adlandırılmaktadır. Latirizm nörolatirizm ve osteolatirizmolmak üzere iki farklı şekilde görülmektedir. İnsan latirizmi olarak adlandırılan latirizm semptomları mesane kanamaları ve bacaklarda spastik felce neden olmaktadır. Genel olarak 30 dakika buharda haşlama veya 150 °C'de 20 dakika pişirmeyle latirojen etki-

nin ortadan kalktığı bilinmektedir (Karnovsky and Karnovsky, 1961; Anonymous, 1963).

1.e. Favizm etkeni ögeler: Favizm, bazı insanlarda baklanın tüketiminin ardından ortaya çıkan hemolitik anemi, hemoglobinüri ve şok şok şeklinde ortaya çıkmaktadır (Beretta, 2023).

1.f. Guatrojenler: Guatrojenler, vücutta iyot eksikliğine neden olan maddelerdir. Guatrojenler, tiroid bezinin işlevine müdahale eden doğal olarak oluşan maddelerdir. Guatrojenler, adını tiroid bezinin büyümesi anlamına gelen "guatr" teriminden almaktadır. Tiroid bezi, tiroid hormonunu sentezlemede zorluk çekiyorsa bu yetersiz hormon üretimini telafi etmek için büyüyebilmektedir. Guatrojenler, tiroidin hormon üretimini zorlaştıran ve özellikle karnıbahar, şalgam, turp, karalahana gibi bitkilerde yer alan kükürtlü glikozit yapısındaki bileşiklerdir. Ayrıca bu maddeler, süt inekleri yukarıda sayılan bitkilerle beslendiğinde süte de geçtiği tespit edilmiştir (Liener, 1969; Chandra 2010).

1.g. Glisirizin: Meyan kökü (*Glycyrrhiza glabra*) eski çağlardan beri bitkisel bir ilaç olarak kabul edilmektedir. Günümüzde değerli farmakolojik etkilere sahip olduğu bilinen bir baharattır. Ancak konuyla ilgili bazı araştırmalar meyan kökünün sağlık üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya koymuştur. Meyan kökü bitkisinin kökleri bitkisinde bulunan bir glikozit olan glisirizin ihtiva etmektedir. Bu madde fazla miktarda alındığında, kan basıncını artırmakta, başağrısı ve yorgunluk yapmaktadır. Ayrıca, ödem ve kalp büyümesine de neden olmaktadır (Baytop, 1999; Chopra et al., 2013; Nazar et al., 2017).

1.h. Saponinler: Saponinler, insan ve hayvan beslenmesinde önemli olan çok sayıda bitki ve bitki ürününde yaygın olarak bulunan steroid veya triterpenoid yapıdaki glikozitlerdir. Saponinlerin çok sayıdaki biyolojik etkileri, hücre zarlarının geçirgenliği üzerindeki etkileriyle ilişkilendirilmiştir. Membranlarda gözenek oluşturma konusunda özel bir yetenekleri vardır. Saponinlerin eritrosit membranları üzerinde litik etki göstermektedir. Kırmızı pancar, şeker pancarı, ıspanak, kuşkonmaz, yer fıstığı ve çay önemli saponin kaynaklarıdır. Bu madde, keskin acı tada sahiptir, köpürtme ve alyuvarları hemolize etme özelliğine sahiptir. Bu nedenle pek çok ülkede içeceklere saponin katılması yasaklanmıştır (Desai et al., 2009; Marelli, 2016).

1.ı. Glikoalkaloidler

Yaygın olarak tartışılan bitki toksinleri gruplarından biridir. Önemli bir gıda olan patates dahil tüm Solanlı bitkilerde bulunmaktadır (Maga,1994). Patatesin ana glikoalkaloidleri olan α-chaconine ve α-solanindir ve bunların hidroliz ürünlerinin çeşitli toksik etkiler gösterdiği saptanmıştır (Hopkins, 1995). Solanin özellikle filizlenmiş ve/veya yeşil patateslerde yüksek oranda yer almaktadır (Anonymous, 1991). Patateslerdeki solanin içeriği bireysel

çeşitler arasında önemli ölçüde farklılıklar göstermektedir ve ışık, ışınlama, mekanik hasar ve depolama gibi çevresel faktörlerden büyük ölçüde etkilenmektedir (Lachman et al., 2001). Öte yandan glikoalkaloidlerin fırınlama, pişirme ve kızartma gibi yaygın gıda işleme uygulamalarından büyük ölçüde etkilenmediği de görültespit edilmiştir. Diyetle maruziyeti azaltmanın en etkili yolu yumruların soyulmasıdır, çünkü patates bitkisinin dış katmanı bu toksinler açısından oldukça zengindir. Yumru büyüklüğüne ve çeşidine bağlı olarak, toplam içeriğin %60'a kadarı manuel soyma ile giderilebilmektedir. Domates, Solanaceae familyasının glikoalkaloit alımına neden olan bir diğer önemli bitki türüdür. Bununla birlikte, tomatin (dehidro tomatin ve α-tomatin karışımını içerir) domates meyvesi olgunlaştıkça büyük ölçüde bozunduğundan, insanlar için patatesten çok daha güvenlidir (Freidman, 2004).

1.i. Solanin: Bir glikoalkoloid olan solanin, patatesteki asetilkolin esteraz inhibitörüdür. Solanin yeşilken patatesin, özellikle kabuk ve sürgün kısımlarında yüksek konsantrasyonlarda yer almaktadır. Solanin, dermatolojik, nörolojik, gastrointestinal, ve kan dolaşımı bozukluklarına neden olabilmektedir (Maga,1994; Lachman et al., 2001).

1.j. Gosipol (Sarı pigment): Pamuk bitkisinin tohum, kök, yaprak ve saplarında yer alan fenolik özellikteki sarı renkli bir pigmenttir. Doğa da yalnızca çiğit yağı ve çiğit ununda bulunmaktadır. Gossipol, pamuk bitkisinin (*Gossypium* sp.) tohumundan, köklerinden ve gövdesinden izole edilen bir polifenoldür. Flavonoidlere benzeyen sarı bir pigment olan madde pamuk tohumu yağında bulunur. Gosipolun serbest ve bağlı olmak üzere iki şekli bulunmaktadır. Çoğu hayvanda kısırlığa ve insanda nispeten düşük dozlarda spermatogenezin durmasına neden olur. Toksik etki göstereni serbest haldeki gosipoldur. Daha çok geviş getirmeyen hayvanlarda etkilidir ve embriyo gelişimini baskılamakta ve erkeklerde infertiliteye sebep olmaktadır (Nomeir and Abou-donia, 1985; Coutinho, 2002).

1.k. Miristisin: Miristisin, hindistan cevizinde bulunan bir maddedir. Ayrıca, karabiber, havuç, deretotu ve maydanozda da az miktarlarda da olsa yer almaktadır. Genel olarak, bulantı, kusma, baş ağrısı, hipotansiyon, asidozis, baygınlık, abdominal distansiyon, ve yüksek dozlarda alındığında karaciğer yetmezliği ve ölüm meydana gelebilmektedir (Seneme et al., 2021).

1.l. Biyojen aminler: Biyojen aminler, aminoasitlerin dekarboksilasyonu ile aldehit ve ketonların deaminasyonu ve transaminasyonu ile sonucunda meydana gelen azotlu bileşiklerdir. Biyojen aminler, proteince zengin gıdalarda mikrobiyal aktivite neticesinde veya fermente gıdalarda veya bazı içkilerde oluşabilmektedir. Ayrıca, muz, patates, ananas ceviz gibi meyvelerde doğal olarak bulunabilmektedirler. Bitkisel gıdalarda doğal olarak bulunan veya faaliyet neticesinde ortaya çıkan bu aminler peynir, sucuk ve diğer gibi fermente gıdalarda da meydana gelebilmektedir. Özellikle peynirlerde bakterilerin fermantatif faaliyetleri sonucunda aminoasitlerin parçalanması sonucu histamin, tiramin, ve triptamin gibi biyojenaminler büyük miktarlara

ulaşabilmektedir. Bunun neticesinde ise biyojenamin zehirlenmesi ortaya çıkmaktadır (Ozcelik et al., 2020; Omer et al., 2021).

1.m. Kafein ve teofilin: Çay, kahve, kola ve kakao gibi içecekler kafeinden zengin maddelerdir ve çay kafeinle haricinde teofilin de ihtiva etmektedir. Günde 5 fincandan fazla içilen kahve merkezi sinir sisteminde belirgin uyarılara, uykusuzluğa ve kalp çarpıntısına neden olmaktadır. Ayrıca, kafein mide salgısını artırarak mide mukozasının tahrişine de yol açmaktadır (Özpalas and Özer, 2017)

1.n. Erusik asit: Kolza (*Brassica campestris*) yağında yaklaşık %20-45 oranında bulunan uzun zincirli doymamış bir yağ asididir. Erusik asit içeren kolza yağının, deney hayvanlarının kalp dokularında değişimlere ve miyokartta önemli yağ birikimine neden olduğu saptanmıştır. Çalışmalardan bazıları, yüksek ve uzun süreli erüsik asit alımının, miyokard lipidozu adı verilen kalp kasındaki yağ birikimindeki artışla bağlantılı olabileceğini ortaya koymuştur (Heijkenskjöld and Ernster, 1975; Galanty et al., 2023).

1.o. Nitrat: Kürlenmiş etler ve sebzeler aracılığıyla vücuda alınmaktadır. Özellikle koyu yeşil yapraklı, lifli ve köklü sebzeler nitrat bakımından zengin gıda maddeleridir. Nitratın toksisitesi, besinlerde veya yenidoğan bebeklerin mide-barsak sistemlerinde nitrite dönüşmesinden kaynaklanmaktadır.Bu nedenle, ıspanak gibi nitrat içeriği yüksek olan koyu yeşil yapraklı sebzelerin 4 ayın altındaki bebeklerde kullanımına dikkat edilmelidir (Ma et al., 2018).

1.ö. Safrol ve Derivatifleri (Türevleri): Karabiber, zencefil, kimyon ve anasonda saptanmış olan bir bileşiktir. Ayrıca, kakao ve hindistan cevizi kabuğundan elde edilen baharat da az miktarda safrol içermektedir. Akut bir toksin olan safrol, orta derecede toksik bir bileşik olarak kabul edilmektedir (Singleton and Kratzer, 1969). Taylor et al. (1965), sıçanlar için oral LD'lerin 0'ın 1950 mg/kg vücut ağırlığı olduğunu, ana semptomların depresyon, ataksi ve ishal olduğunu ve ölümün 4 saat ila 5 gün içinde gerçekleştiğini bildirmiştir.

1.p. Pirolizidin alkaloidleri: Pirolizidin alkaloitleri, yaklaşık 350 kimyasal maddeyi içeren büyük bir doğal toksin grubudur: bunların birçoğunun hayvanlarda kanserojen olduğu gösterilmiştir ve bu nedenle potansiyel insan kanserojenleri olarak sınıflandırılır. İnsanların zehirlenmesi, genellikle gıda kaynaklarının bu alkaloidleri içeren tohumlarla kirlenmesi nedeniyle çeşitli şekillerde meydana gelebilmektedir. Başka bir maruz kalma yolu ise, geleneksel ilaçlarda veya bazı besin takviyelerinde pirolizidin içeren bitkilerin bulunmasıdır (Coulombe, 2003).

1.1. **Sağlığı Koruma Potansiyeli olanlar**

1.1.a. Fitoöstrojenler: Soya fasulyesi ve benzeri ürünlerde (çoğunlukla izoflavonlar), tam tahıllı tahıl gıdalarda, tohumlarda ve yemişlerde özellikle de sert kabuklu yemişlerde (çoğunlukla lignanlar) bulunan biyolojik aktiviteye sahip fitoöstrojenler bulunmaktadır (Barret, 1996). Mevcut epidemiyolojik

araştırmalar, bunların kanserden koruyucu rolleri hakkındaki hipotezi güçlü bir şekilde desteklemektedir; çünkü diyetlerinde bu gıdaları tüketen ülke veya bölgelerde kanser insidansının daha düşük olduğu ortaya konulmuştur (Bingham et al., 1998). Fitoöstrojenlerin esas olarak meme, yumurtalık ve/veya endometriyal kanser gibi hormona bağlı kanserleri önlediği varsayılmaktadır. Son zamanlarda soya estrojenleri daidzein, genistein, glisitin içeren çeşitli gıda takviyeleri kadınlarda menopozal sendromların azaltılmasında popüler hale gelmiştir. Öte yandan, fitoöstrojenlerin doğum öncesi ve yenidoğan gelişimi sırasındaki olası kötü etkileri konusunda endişeler mevcuttur. Örneğin, çiftlik hayvanlarında doğurganlık kaybı ve bazı üreme lezyonlarının oluşumu, hayvanların tükettikleri yoncanın güçlü bir bitki östrojeni olan kumestrol'i içermesinden kaynaklandığı rapor edilmiştir. Sıçanlarda yapılan denemelerde ise, bitki hormanları açısından zengin bir diyet uygulandığında uterus ağırlığında değişiklik ve nöroendokrin gelişiminde azalmanın olduğu gözlemlenmiştir (Barret, 1996; Bingham et al., 1998).

1.1.b. Glikozinolatlar: Glikozinolatlar, hem sağlıkla ilgili endişeler hem de beklenen sağlık yararları nedeniyle uzun yıllardır bilimsel açıdan büyük ilgi gören önemli bir bileşik grubudur. Öncelikle farklı lahana türleri, karnabahar, brokoli ve brüksel lahanası gibi çok sayıda sebzeyi içine alan *Brassicaceae* familyasında bulunmaktadır. Şu anda 100'den fazla farklı glikozinolat bilinmektedir (Talatay and Fahey, 2001). Glikozinolatlar**,** minimal biyolojik aktivite sergilerler, ancak hücre hasarı üzerine endojen enzim mirosinaz tarafından hidrolize uğrayarak diğerlerinin yanı sıra izotiyosiyanatlar ve indollerin biyolojik aktif gruplarını vermektedirler. Bu parçalanma ürünlerinden bazıları, guatrojenik ve/veya mutajenik özelliğe sahip olduğu deney hayvanları üzerinde yürütülen çalışmalarla ortaya konulmuştur. Buna karşılık, glikozinolat parçalanma ürünlerinin, *Brassicaceae* sebzelerinin akciğer ve sindirim yolu kanserlerine karşı koruyucu bir etkisi olduğunu gösteren geniş epidemiyolojik kanıtlar bulunmaktadır. Hem çiğ hem de pişmiş olarak tüketilen bu sebzeler vivo olarak güçlü biyolojik aktiviteye sahip olduğu saptanmıştır (Johnson, 2000; Mithen et al., 2000.

2. Mantar toksinleri: Mantar ve mantar çeşitlerinde bulunan bir grup toksindir. Bu durum daha çok yabani mantarlarda görülmektedir. Mantarlar klorofil ihtiva etmeyen, saprofit veya parazit olarak yaşayan ve sporla üreyen canlı organizmalardır. Zehirli mantar tipleri şunlardır; şapkalı mantarlar, inocybe mantarları, cortinarius mantarları ve sihirli mantarlardır. Bu mantarlar ciddi derecede mide-bağırsak enfeksiyonuna ve ardından karaciğer veya böbrek yetmezliğine neden olabilmektedirler. Bazı durumlarda ise ölümcül etki gösterebilmektedirler. Mantar zehirlenmesi; bazı mantar türlerinin çiğ veya pişmiş olarak tüketilmesi sonucu ortaya çıkmaktadır (Lurie et al., 2009; Lima et al., 2012).

3. Hayvansal kaynaklı toksinler

Hayvansal kaynaklı bozulmalar veya toksinler daha çok bakteriyel bozulmalar veya enzim faaliyetleri sonucunda meydana gelmekte ve zehirlenmelere yol açmaktadır. Ancak hayvansal kaynaklı gıdalarda bulunan doğal toksinler taze olarak vücuda alınsa bile toksijenik etki meydana getirerek zehirlenmelere yol açmaktadır. Hayvansal kaynaklı toksinlerin meydana getirdiği hastalıklar aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilmektedir (Eriksson et al., 2003; Fox and Serrano, 2007).

3.1. Deniz ve tatlı su hayvanlarından kaynaklanan toksinler: Kabuklu su ürünleri ve balıkların tüketimi sonucunda çeşitli zehirlenmeler meydana gelebilmektedir. Bu durum intoksikasyon veya toksienfeksiyonlar olarak adlandırılmaktadır. İstiridye ve midye gibi birçok kabuklu deniz canlısı gıda zehirlenmesine neden olan güçlü toksinler ihtiva etmektedir. Bunlar, felçli zehirlenme, nörotoksik zehirlenme, ishal zehirlenmesi ve amnezik zehirlenmeye neden olabilmektedir (Russel, 1968; Scott, 1969; Liener, 1973).

3.1.1. Saksitoksin: Midye, istridye gibi kabuklu su ürünlerinin tüketimi ile insanlarda belirli zehirlenme olayları meydana gelmektedir. İnsan için normalde toksik etkiye sahip olmayan midye ve istridye gibi vücutta toksik maddeleri biriktiren kabuklu su ürünlerinin tüketilmesi sonucunda zehirlenme ortaya çıkmaktadır (Liener, 1973, Russel, 1968; Scott, 1969). Bu özellikteki yaklaşık yirmi kadar toksin olduğu bilinmektedir. Bu toksinler daha çok saksitoksinlerdir. Bu toksinler, ısıl işlemlere karşı son derece dayanıklıdır. Bu kabuklular tüketildiğinde, bağlanmış toksik öge hemen açığa çıkmakta ve kaslarda felce yol açmaktadır. Ölüm olayı genellikle solunum felcinden sonra ortaya çıkmaktadır (Liener, 1973; Lindner, 1979).

3.1.2. Tetrodotoksin: Balon balığı ve kirpi balığı gibi puffer gurubu balıkların testis ve ovaryumları tetrodotoksin olarak bilinen çok güçlü bir toksin içermektedir. Bu balıklardaki toksin miktarı üreme döneminde artış göstermektedir. Bu balıkların tüketilmesinden kaynaklanan zehirlenmeler oldukça şiddetli olan deniz ürünleri zehirlenmesidir. Tetrodoksin zehirlenmesindeki semptomlar, genellikle balık tüketiminden 10-45 dakika sonra ortaya çıkmaktadır (Kuru, 1983, Liener, 1973; Scott, 1969).

3.1.3. Skombrotoksin: Bu zehirlenme, uskumru, palamut ve orkinos gibi Scombridae familyasına ait balıkların tüketilmesi sonucu Skombroid zehirlenmeler şeklinde ortaya çıkmaktadır (Scott, 1969; Anonymous, 1980; Hobbs and Hodgkiss, 1982). Bu zehirlenme, belirtilen balıkların bünyesinde bulunan yüksek orandaki histamin miktarıyla ilişkili bulunmuştur. Yüksek miktarda histamin ve bazı vazoaktif aminlerin vücuda alınması sonucunda scombroid zehirlenmeler ortaya çıkmaktadır (Anonymous, 1980). Histamin gibi biyojenaminler, bazı bakterilerin gelişimi ve sahip oldukları dekarboksilaz enzimleri ile gıdalarda bulunan histidin gibi aminoasitler üzerindeki etkileri sonucunda oraya çıkmaktadır. Ton balığı gibi balıkların yapısında bulunan histidin aminoasidi, balıklar hızlı bir şekilde soğutulmadığında veya

işlenmediğinde *Enterobactericiae* familyası mikroorganizmalar tarafından dekarboksile edilerek histamine dönüştürülmektedir. Bu tip histamin zehirlenmelerin ilk belirtileri, yanma, isilik ve kan basıncında düşme gibi ortaya çıkmaktadır. Genellikle baş ağrısı ve deride kaşıntıya da neden olabilmektedir. Ayrıca; ishal, bulantı ve gibi rahatsızlıklar da görülmektedir (Anonymous, 1980; Hobbs and Hodgkiss, 1982).

4. Zehirli bal (Deli bal): Toksik bal diğer bir adıyla "zehirli bal" Karadeniz bölgesinde (Samsun ve Kastamonu); halk arasında "deli bal" olarak adlandırılmaktadır. Bu balda bulunan grayanotoksinler, intoksikasyon olayının temel kaynağıdır. Ayrıca, bu özellikteki balda bulunan temel toksik madde, bir glikozit olan andromedotoksindir. Arıların sarı ağu ve kara ağu bitkilerinin çiçeklerinden bal üretmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bir kişi bu özellikteki baldan 50-100 gram yemesi durumunda zehirlenme olayı ortaya çıkmaktadır. Zehirlenme sonucunda, karın ağrısı, ishal, bulantı, kusma, baş dönmesi, deride yanma, aşırı terleme, sinirsel bozukluklar ortaya çıkmaktadır. Kol ve bacaklarda felç durumu söz konusu olabilir ancak ölüm nadiren gerçekleşir. Bu bal uzun süre depolandığında veya ısıl işlem uygulandığında toksik özelliğini kaybetmektedir (Steyn, 1973; İçme and Çevik, 2010).

5. Avidin: Çiğ yumurta akında bulunan bir proteindir. Özellikle biotin ile bağlanarak bu vitaminin metabolizmada kullanılmasını engellemektedir. Yumurta pişirilince biotin serbest hale geçmektedir ve bu durum ortadan kalkmaktadır (Baysal 1979).

6. Memelilerde bulunan toksik maddeler: Avusturalya deniz aslanı, kuzey kutup ayısı ve sakallı ayı balığının karaciğeri **y**üksek düzeyde A vitamini ihtiva ettiğinden dolayı toksik özellik göstermektedir (Scott, 1969).

7. Biyojen aminler: Peynir gibi hayvansal gıdalarda bakterilerin faaliyetleri sonucunda aminoasitlerin dekarboksilasyonu neticesinde histamin, triamin ve triptamin gibi biyojenaminler meydana gelmekte ve bunlar yüksek miktarlara ulaşmaktadır. Bu aminler normalde monoamino oksidaz enzimi ile detoksifiye edilmesine rağmen bazı durumlarda kan basıncı artışına, beyin kanamasına ve biyojenamin zehirlenmesine neden olabilmektedir. Ciddi durumlarda ölüme dahi neden olabilmektedir (Liener, 1973).

4. Mikrobiyal kaynaklı toksinler

4.1. Mikotoksinler: Küflerin birçoğu insan ve hayvanlarda zehirlenme problemine neden olan toksik maddeler oluşturma özelliğine sahiptir. Küflerin ürettiği bu zehirli metabolitlere mikotoksin adı verilmektedir. Mikotoksin, mykes ve toxicum kelimelerinin birleşmesiyle meydana gelen ikincil metabolitlerdir. Tabiatta bulunan yaklaşık olarak 400 küf türü çevre şartlarının uygun olması durumunda mikotoksin üretme özelliğine sahiptir. Özellikle *Penicillium, Aspergillus,* ve *Fusarium* cinslerine ait olan küf türleri sağlık açısından önemli risk oluşturan mikotoksin üretebilmektedir. (Tunail, 2000; Erzurum, 2001). İnsan sağlığını tehdit eden en önemli kaynaklardan biri de küflenmiş gıdalardır. Küfler çevrede çok yaygın olarak bulunmakta ve işlenmiş,

işlenmemiş ve yarı işlenmiş pek çok gıda maddesine kontamine bozulmalara neden olabilmektedirler. Küfler, gıda maddelerinin üretimi, hazırlanması, depolanması ve satışı sırasında gıdalara bulaşmakta ve ikincil metabolitler olan mikotoksinler üretebilmektedir. Gıdalarda küflerin gelişiminin engellenmesi oldukça zordur; ancak gıdaların işlemesi ve depolaması sırasında hijyenik koşullar sağlandığında bu durumun önüne geçilebilir. Buna karşılık ılık ve nemli iklime koşullarına sahip tropik bölgelerde gıdalarda küf gelişimi riski de artmaktadır. Mikotoksinin etkisi vücuda alınan toksinin miktar ve tipine göre farklılık göstermektedir. Önceki zamanlarda pek bilinmeyen ve önemsenmeyen mikotoksin zehirlenmeleri özellikle son yıllarda oldukça önem kazanmıştır (Adams, 2000; Blank, 2001; Wilson 2001)

4.1.1. Küfler tarafından üretilen önemli mikotoksinler:

- **Aflatoksin**

Bu toksin, *Aspergillus flavus* ve *Aspergillus parasiticus* gibi küfler tarafından sentezlenen önemli bir mikotoksindir ve difuranokumarin türevi bir maddedir. Şu ana kadar B1, B2, B2a, G1, G2, G2a, M1, M2 olmak 8 ayrı mikotoksin türü saptanmış olup, bunlardan gıdalarda ve tarım ürünlerinde en fazla toksik etkiye sahip olanı B1 olup bunu G1 toksini izlemektedir. Bu toksini üreten küfler %85 nisbi rutubete sahip ortamlarda ve 10-40°C gibi sıcaklık aralığında tahıllar, baklagiller, çerezler, incir, pamuk çiğiti ve hayvan yemlerinde kolaylıkla üreyerek aflatoksin üretmektedirler. Hayvanlarda yemler ile alınan aflatoksin ise süte, ete ve yumurtaya geçebilmektedir (Adams, 2000; Blank 2001; Wilson 2001)

- **Okratoksin**

Küflü pirinç ve arpada tespit edilen mikotoksinlerden biridir. Okratoksinler, 7 *Aspergillus* ve 6 *Penicillium* türü tarafından üretilebilen ve gıda maddelerinde kolayca çoğalarak zehirlenmelere yol açan bir toksindir. Bu toksin, ortalama 20-30°C ve %95 nisbi rutubetli ortamlarda küfler tarafından üretilmektedir *Penicillium viridicatum*, *P. frequentans*, *P. cyclopium*, *P. expansum*, *P. nidulans* ve *Aspergillus ochraceus*, tarafından üretilmektedir. Bu toksin, fenilalenine bağlanmış izokumarin yapısındadırlar ve 10 çeşit türevi bulunmaktadır. Özellikle, A, B, C ve 4-metil hidroksiokrratoksin A bunlardan en önemli olanlarıdır. Özellikle, okratoksin A kuvvetli bir toksindir ve hayvanların büyümesine engel olmakta, böbrek genişlemeleri ve diğer bozukluklara yol açarak ölümlerine neden olmaktadır. Ayrıca okratoksinin insanlarda da böbrek hastalıklarına neden olabileceği bildirilmiştir (Adams, 2000; Blank 2001; Wilson 2001).

- **Patulin**

Bu toksin *Penicillium, Aspergillus*, *Penicillium* ve *Byssochlamys* türleri tarafından üretilen bir mikotoksindir. İlk olarak *Penicillium claviforme* küfünden izole edilmiştir. Özellikle *P. patulum, P. expansum, P. claviforme , A. clavatus, A. terreus,* ve *Byssoclamys nivea* küfleri tarafından da üretilmektedir. Daha çok elma suları, küflü ekmek ve üzüm, şeftali, elma gibi meyve

sularında belirtilen küflerin çoğalması neticesinde ortaya çıkmaktadır. Patulinin, antibiyotik özelliklerinin yanında kanserojen, mutajen ve teratojen niteliklerinin olduğu da saptanmıştır. Patulin pH 6'ya kadar asidik ortamlara stabilite göstermektedir. Bu pH değerinde ısıya karşı direnç gösterip 125 ˚C sıcaklıkta dahi bozulmamaktadır. Patulin meyve suyu sanayi bakımından çok önemli bir toksindir (Adams, 2000; Blank 2001; Wilson 2001).

- **Zearalenon (ZEN)**

Bir küf türü olan *Fusarium* tsrsfındsn sentezlenen bir metabolit olan ZEN, fenolik rezosilik asit ve lakton yapısında bir mikotoksindir. Fermentasyon Bu toksin, östrojenik madde veya F-2 toksini adı ile tanınmaktadır. ZEN direk bir toksik madde olmaktan çok hormon benzeri kimyasal yapıya da sahiptir. Küflenme, özellikle buğday, mısır, yulaf ve arpa gibi tahıllarda tarlada bekleme sırasında veya depolama süresince meydana gelebilir. Hayvanların küflü yemlerle beslenmesi durumunda bir takım östrojenik hastalıklar ortaya çıkmaktadır. Kronik vakalarda özellikle yumurtalık atrofisi, vulva ve memede ödemli şişme, yavru atma, fertilite bozuklukları ve gibi klinik belirtiler ile ortaya çıkmaktadır (Adams, 2000; Blank 2001; Wilson 2001).

- **Trikotesenler**

Trikotesen Fusarium türleri tarafından üretilen bir mikotoksindir. Ayrıca, *Cephalasporium* ,*Trichoderma* ve *Trichothecium* gibi küf cinsleri tarafından da ikincil bir metabolit olarak sentezlenebilmektedir. Bu toksin suda erir, renksiz, kristal, optikçe aktivite gösteren bir moleküldür. Saklama ve normal pişirme süresince bozulma göstermezler. Bu toksinleri üreten küfler birçok gıda maddesinde kolaylıkla üreyebilmektedir. Trikotesenler, protein ve DNA sentezini inhibe etmektedirler ve bazı türleri antibakteriyel, antiviral ve antifungal aktivite göstermektedirler (Adams, 2000; Blank 2001; Wilson 2001)

- **Fumonisin**

Fusarium moniliforme ve *F. proliferatum* tarafından üretilen bir grup mikotoksindir ve özellikle mısırda sıklıkla raslanılmaktadır (Adams, 2000; Blank 2001; Wilson 2001).

- **Rubratoksinler**

Penicillum rubrum ve *P. purpurogenum* küfleri tarafından üretilen bir toksindir. Özellikle tahıllar, soya fasulyesi, yer fıstığı ve sebzelerde üreyerek toksin üretmektedirler. Aflatoksin lerin oluşum şartlarına benzer ortamlarda ortaya çıkmaktadırlar. Bu nedenle aflatoksin tespit edilen ortamlarda rubratoksin de tespit edilebilmektedir (Adams, 2000; Blank 2001; Wilson 2001).

- **Sterigmatosistinler**

8 ayrı *Aspergillus* türü tarafından özellikle de *Aspergillus versicolor* ve *A. nodulans* tarafından üretilmektedir. Kimyasal yapı bakımından aflatoksinle-

re benzerlik göstermektedir (Adams, 2000; Blank 2001; Wilson 2001).

➢ **Sitrinin**

İlk olarak *Penicillium citrinum* küfünün bir metaboliti olarak tespit edilmiştir. Daha sonra yapılan araştırmalarda 13 farklı *Penicillium* ve 3 farklı *Aspergillus* gibi küfler tarafından da sentezlendiği saptanmıştır. Okratoksin A gibi böbrekler üzerinde toksik etki gösteren bir toksindir. Ayrıca, kanserojenik ve mutajenik etkide gösterebilmektedir. Genellikle küflü tahıllarda sıkça rastlanılmaktadır (Adams, 2000; Blank 2001; Wilson 2001).

➢ **Ergot Alkoloidleri**

Ergot alkoloidleri, en eski mikotoksikozis zehirlenmesi olan ergotizmin nedeni olan *Claviceps* türü küfler tarafından üretilmektedir. Çok rutubetli, bol yağışlı ve sıcak bölgelerde ürünlerde *Claviceps purperea*, ergot alkoloidi üretmektedir. Ergokriptin, ergokornin, ergotemin, ergonovin, ergozin ve ergokristin gibi ergot alkoloidleri vücuda alındıktan sonra kolayca emilerek hızlıc avücuda yayılabilmektedir.Yüksek miktarda alındığında ise merkezi sinir sistemini etkileyerek kasılmalara, kalp çarpıntısına ve solunum sisteminde felce yol açmaktadır (Adams, 2000; Blank 2001; Wilson 2001).

4.2. Bakteriyel Toksinler

Gıda kaynaklı mikrobiyal hastalıkların büyük çoğunluğu bakteriyel kaynaklı olup hızlıca ortaya çıkmaktadır. Patojen mikroorganizmaları veya bunların ürettiği toksini ihtiva eden bir gıdanın tüketimi sonucu ortaya çıkan hastalıklara "Gıda Kaynaklı Mikrobiyal Hastalıklar" adı verilmektedir (Topal, 1996). Gıda kaynaklı mikrobiyal hastalıklar enfeksiyon ve intoksikasyon olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Frazier, 1988).

Enfeksiyon: Gıdalara çeşitli şekillerde bulaşan patojen mikroorganizmaların insanlara bulaşması ve hastalık meydana getirmesine enfeksiyon adı verilmektedir. Her iki gıda kaynaklı hastalığında insanı etkilenmesi için mikroorganizma veya miktarının gıdada belirli bir seviyeye ulaşması gerekmektedir (Wilson, 2001).

İntoksikasyon: Gıda maddesine çeşitli şekilde patojen mikroorganizmaların üremeleri sırasında salgıladıkları ve gıda maddesi içerisinde biriken toksinlerinin, söz konusu gıda maddesinin tüketimi sonucunda meydana gelen zehirlenmeye intoksikasyon adı verilmektedir (Wilson 2001).

4.2.1. Gıda kaynaklı bakteriyel intoksikasyonlar

➢ ***Clostridium botulinum* zehirlenmeleri**

C. botulinum tarafından üretilen ekzotoksinlerinin gıda maddeleri ile alınması sonucu ortaya çıkan zehirlenmeye botulizm adı verilmektedir. Botulizm tipi zehirlenmenin genellikle ölüm ile sonuçlanması bu zehirlenme

tipini daha da önemli kılmaktadır. *C. botulinum*'un A, B, E, F tipi insanlarda C ve D tipi ise sığırlarda zehirlenmelere neden olmaktadır. *C. botulinum* fiziko-kimyasal faktörlere dirençlidir ancak 1000C'de 20 dakikada inaktive olmaktadır. Botulizm tamamen *C. botulinum* tarafından üretilen toksinlerin yaptığı bir zehirlenmedir. Bu toksinler, asitlere dirençli, ısıya dayanıksız, suda çözünen, yüksek moleküllü protein tabiatındadır ve bilinen en öldürücü bakteriyal toksindir (Tunail 1997; Wilson, 2001).

- ***Staphylococcus aureus* zehirlenmeleri**

S. aureus türleri serolojik olarak farklı A, B, C1, C2, D, E, F ve G olmak üzere 8 farklı üretmektedir. Bunlardan gıda zehirlenmeleri bakımından önem taşıyan enterotoksin A tipidir (Tunail, 2000; Wilson, 2001).

4.2.2. Gıda kaynaklı bakteriyel Enfeksiyonlar

Hastalık etkeni patojen mikroorganizmaların gıdalarla vücuda alması neticesinde meydana gelen hastalığa "Gıda Kaynaklı Enfeksiyon" adı verilmektedir (Tunail, 2000; Karapınar ve Aktuğ Gönül,1998).

Enfeksiyonlar iki şekilde ortaya çıkmaktadır.

a) Pasif gıda enfeksiyonları: Bu tip enfeksiyonda, gıda mikroorganizma için sadece taşıyıcı işlevi görüyor ancak mikroorganizma gıda içinde çoğalmamaktadır. Mycobacter tuberculosis ve Vibrio parahaemolyticus pasif gıda enfeksiyonuna neden olan mikroorganizmalar arasında yer almaktadır (Tunail, 2000; Karapınar ve Aktuğ Gönül, 1998).

b) Aktif gıda enfeksiyonları: Aktif gıda enfeksiyonunda; patojen mikroorganizma gıda içerisinde çoğalmakta ve belirli bir sayıya ulaşması sonucu hastalık ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde ortaya çıkan enfeksiyona "Aktif gıda olarak adlandırılmaktadır (Tunail, 2000; Karapınar ve Aktuğ Gönül, 1998).

3) Kimyasal kontaminasyonlar

Kimyasal kaynaklı gıda kontaminantları, tipik olarak çevresel kirlilik unsurları, gıda işleme sırasında oluşan bulaşmaları, onaylanmamış katkı maddelerini, gıda katkı maddelerini ve ambalaj malzemelerinden kaynaklanan migrasyonları içermektedir (Mastovska, 2013). Çevresel kontaminantlar, insanlar tarafından bulaştırılan veya sudan, havadan veya topraktan doğal olarak bulaşan yabancı maddeleri içermektedir. Gıda işleme kontaminantları; pişirme, kavurma, konserveleme, ısıtma, fermantasyon veya hidroliz sırasında gıdada oluşan istenmeyen bileşikleri içermektedir. Gıdanın ambalaj malzemeleriyle doğrudan teması, bazı zararlı maddelerin gıdalara geçmesi nedeniyle kimyasal kontaminasyona yol açabilmektedir. Ayrıca onaylanmamış veya hatalı katkı maddelerinin kullanımı da gıda kirliliğine neden olabilmektedir Schrenk, 2004).

Gıdalara bulaşan kimyasal kontaminasyon unsurları çevresel faktörler,

tarımda kullanılan ilaçlar, gübreler, veteriner ilaçları, hormonlar, gıda katkı maddeleri ve pakatleme materyallerinden kaynaklanan faktörler olmak üzere geniş bir dağılım göstermektedir. Bu kontaminantların konsantrasyonları genel olarak %0.01'den az olmasına rağmen bazıları oldukça toksik özellik göstermektedir. Günümüzde kimyasal kontaminasyona uğramayan besin neredeyse yok gibidir.

Kimyasal kontaminasyon unsurları kendi arasında çeşitli guruplara ayrılmaktadır.

3.1.) Metaller: Gıdalar üretim ve tüketim zincirinin çeşitli aşamalarında kontaminasyona maruz kalabilmektedirler. Toksik iz elementler gıdalara üretim basamağında; Hava, su, toprak ve tarımda kullanılan ilaç ve gübrelerden; işleme sırasında, kullanılan metal ekipman ve ambalajlama materyalinden kontamine olabilmektedir.

3.2.) Poliklorlanmış Bifeniller (PCBs): PCBs, heterojen yapıdaki bir grup kimyasal maddeden meydana gelmektedir ve gıdalara farklı kaynaklardan kontamine olabilmektedir. Bu maddenin suda çözünürlüğü oldukça zayıftır, stabildirler ve kolayca bozunmamaktadır. Ayrıca, spesifik koşullar altında dibenzo dioksin ve dibenzofuranlara okside olabilmektedir. Bu maddeler, kanserojenik, nörotoksik ve teratojenik etkiler meydana getirebilmektedir ve çeşitli enzimlerin çalışma sitemlerini bozabilmektedir. PCB'ler hem erkeklerde hem de kadınlarda tiroid ve üreme fonksiyonlarını değiştirmekte ve kardiyovasküler, karaciğer hastalıkları ve diyabet gelişme riskini artırmaktadır. Kadınlarda, yaşam boyu çeşitli hastalıklara yakalanma riskini artırmakta ve düşük doğum ağırlıklı bebek doğurma riskine neden olmaktadır. Gıdaların yapısında bulunan PCBs miktarı son yıllarda bu maddenin kullanımının yasaklanmasından dolayı azalmıştır (Carpenter, 2006).

3.3.) Dioksin: Dioksinler, poliklorludibenzo-ρara-dioksinler (PCDD), poliklorludibenzofuranlar (PCDF) ve poliklorlubifeniller (PCB)'leri içeren insan ve hayvan sağlığını tehdit eden önemli bir toksik madde gurubudur. Lipofilik özellikte olmalarından ve suda çözünürlüklerinin az olmasından dolayı gıdalarda birikebilmektedirler. İnsanlar tarafından yiyecek, içecek, solunum ve deri yolu ile alınan dioksinler, metabolizmada oldukça yavaş bir şekilde parçalanmakta ve vücutta biriken dioksinler farklı organlarda kümülatif etkiler meydana getirebilmektedir (Güneş, 2007; Çiftçi, 2008). Özellikle iştahsızlık, deride renk değişiklikleri, psikolojik ve nörolojik sorunlar, yüksek tansiyon, kolesterol yüksekliği ve karaciğer rahatsızlıkları gibi sorunlar meydana getirebilmektedirler. Bunun dışında doğumsal anomalilere ve kanser oluşumuna da neden olabilmektedirler (Arıkan vd., 2009).

3.4) Pestisit kalıntıları (Tarım ilaçları): Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte tarımsal üretimi artırmak amacıyla tarım ilaçları yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Bu ürünlerin üretimi sırasında, ilaçlama ile gıdala-

ra bulaşan bu kimyasal maddeler "pestisit" olarak adlandırılmaktadır. Pestisitler çok çeşitli guruplara ayrılmaktadır. Bunlar; fungusitler, herbisitler, insektisitler, akarasitler, apisitller, molusidler, nematisidler ve rodentisidlerden oluşmaktadır. Kronik sağlık etkileri arasında kanser ve diğer tümörler yer almaktadır. Ayrıca, beyin ve sinir sistemi hasarına neden olmakta, doğum kusurları; kısırlık ve diğer üreme sorunları meydana getirmektedir. Bunun dışında karaciğere, böbreklere, akciğerlere ve diğer vücut organlarına da zarar vermektedir (Stamati et al., 2016; Pathak et al., 2022).

3.5) Veteriner hekimlikte kullanılan ilaçlar: Hayvanlarda meydana gelen hastalıkların önlenmesi tedavi edilmesi ile hayvanın yemden yararlanmanın artırılması ve gelişiminin hızlandırılması için ilaçlar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu amaçlarla yararlanılan bir dizi ilaç arasında antibiyotikler önemli bir yer tutmaktadır (Lust et al., 2011; Ture et al., 2019).

3.6) Ambalaj malzemelerinden gıdaya taşınan kontaminantlar: Bunlar, plastifiyanlar ve plastik monomerleridir. Özellikle polivinil klorid (PVC), fitatlar (DHPE, DINP ve diğerleri), polisitiren, polietilen (PET), polyester, akrilik, tetrafluro etilen, poliüretan form en yaygın kullanılan ambalajlama materyalleridir. Bunların ise sağlık üzerine pek çok yan etkisi bulunmaktadır. Gıda işleme, paketleme, taşıma ve depolama aşamaları da gıda kontaminasyonuna önemli katkılarda bulunmaktadır. Bu kimyasal kirleticilerin insan sağlığı üzerindeki etkileri, hafif gastroenteritlerden ölümcül hepatik, renal ve nörolojik sendrom vakalarına kadar değişen ciddi sonuçlardır (Rather et al., 2017).

KAYNAKLAR

Adams MR, Moss, MO. 2000. Food Microbiology. Second Edition. RS.CMPG Boks Ltd, Bodmin, Cornwall, UK. p. 479.

Ajaykumar VJ, Mandal PK. 2020. Modern concept and detection of spoilage in meat and meat products. In Meat Quality Analysis, Academic Press pp: 335-349.

Anonymous 1980. Microbial Ecology of Foods. Volume II, Food Commodities by The International Commision on Microbiological Spesifications for Foods. Academic Press. New York, London, Toronto, Sdney and san Francisco, pp: 588-589.

Anonymous 1963. Toxic components of lathyrous peas: Nutr. Rev 21: 28.

Anonymous 1975. Naturally Occurring Toxicants in Foods. A Report by the Institute of Food Technologists Expert Panel on Food Safety and Nutrition and the Committee on Public Information. FooD Technol p: 67.

Arıkan D, Yetim H, Sağdıç O, Kesmen Z. 2009. Gıdalarda dioksin kontaminasyonu ve insan sağlığı üzerine etkileri. Gıda Teknol Elek Derg12(2): 9-15.

Baluka SA, Miller R and Kaneene JB. 2015. Hygiene practices and food contamination in managed food service facilities in Uganda. African J Food Sci 9(1):31-42.

Barret J. 1996. Phytoestrogens. Friends or foes? Health Persp 104: 478.

Baysal A. 1979. Beslenme. Hacettepe Üniversitesi Yayınları A. 13., III. Baskı Ankara p:199.

Baytop T. 1999. Türkiye'de Bitkilerile Tedavi, Geçmişte ve Bugün, İkinci baskı, Nobel Tıp Kitapevleri, İstanbul.

Beretta A, Manuelli M, and Cena H. 2023. Favism: Clinical Features at Different Ages. Nutrients 15: 343.

Bingham SA, Atkinson C, Liggins, J, Block J, Coward A. 2000. Phyto-oestrogens: where are we now? British J Nutr 79: 393-406.

Blank G, Cumming R. 2001. Irradiation. "in: Food Shelf Life Stability, Chemical, Biochemical, and Microbiological Changes. Edited by Eskin, N.A. and Robinson, D.S., CRC Pres LLC, Boca Baton, Florida p.87-129.

Burns RA. 1987. Protease Inhibitors in Processed Plant Foods. J Food Protect 50(2):161-166.

Carpenter DO. 2006. Polychlorinated biphenyls (PCBs): routes of exposure and effects on human health. Rev Environ Health 21(1):1-23.

Chandra AK. 2010. Chapter 42- Goitrogen in Food: Cyanogenic and Flavonoids Containing Plant Foods in the Development of Goiter. Bioactive Foods in Promoting Health Fruits and Vegetables, pp: 691-716.

Chopra PKPG, Saraf BD, Inam F, Deo SS. 2013. Antimicrobial and antioxidant activities of methanol extract roots of Glycyrrhiza glabra and HPLC analysis. Int J Pharm Sci 5:157-160.

Coulombe RA Jr. 2003. Pyrrolizidine Alkaloids in Foods. Adv Food Nutr Res 45: 61-99.

Coutinho EM. 2002. Gossypol: a contraceptive for men. Contraception 65(4): 259-263.

Çiftçi O. 2008. Elâzığ ve çevresinde tüketilen tereyağlarında, dioksin ve benzeri bileşik düzeylerinin araştırılması. FÜ Sağ Bil Derg 22(5): 289 – 292.

D'Mello J.P.F. (ed.). 2003. Food Safety Contaminants and Toxins. Wallingford, Oxon.

Das AK, Nanda PK, Das A, Biswas S. 2019. Hazards and Safety Issues of Meat and Meat Products. In Food Safety and Human Health. Academic Press 145-168.

Davidek J. 1995. Natural Toxic Compounds of Foods: Formation and Change During Food Processing and Storage. CRC Press, Boca Raton. ISBN 9781315895833, 1st Edition, 280 Pages.

Desai SD, Desai DG, Kaur H. 2009. Saponins and their Biological Activities. Pharm Times 41(3): 13-16.

Dolan LC, Matulka RA, Burdock GA. 2010. Naturally occurring food toxins. Toxins 2:2289-2332.

Eriksson UG, Bredberg U, Gislén K, Johansson LC, Frison L, Ahnoff M, et al. 2003. Pharmacokinetics and pharmacodynamics of ximelagatran, a novel oral direct thrombin inhibitor, in young healthy male subjects. Eur J Clin Pharmacol 59(1): 35-43.

Erzurum K. 2001. Gıdalarda mikotoksin oluşumunu etkileyen faktörler. Gıda 26(4): 289-293.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2019. TheWorld Health Organization (WHO). Codex Allimentarius International Food Standards. General standard for contaminants and toxins in food and feed. (Last amended 2019). CODEX STAN, 193–1995. Available online: http://www.fao.org/fao-whocodexalimentarius /codex-texts/list-standards/en/ (accessed on 10 February 2020).

Fox JW, Serrano, SMT. 2007. Approaching the golden age of natural product pharmaceuticals from venom libraries: An overview of toxins and toxin-derivatives currently involved in therapeutic or diagnostic applications. Curr Pharm Des 13(28): 2927–2934.

Frazier WC, Westhoff DC. 1988. Food Microbiology. Fourth Edition. McGraw Hill International Editions, Singapore p. 539.

Freidman M. 2004. Analysis of bi ologically active compounds in potatoes (Solanum tuberosum), tomatoes (Lycopersicon esculentum), and jimson weed (Datura stramonium) seeds. J Chromatogr A 1054:143-155.

Galanty A, Grudzińska M., Paździora W, Paśko P. 2023. Erucic Acid -Both Sides of the Story: A Concise Review on Its Beneficial and Toxic Properties. Molecules 28(4): 1924.

Gibb H, Devleesschauwer B, Bolger PM, Wu F, Ezendam J, Cliff J, et al. 2015.World Health Organization estimates of the global and regional disease burden of four foodborne chemical toxins, 2010: a data synthesis. F1000 Res. 2015 Dec 3;4:1393. doi: http:// dx .doi .org/ 10 .12688/ f1000research .7340 .1 PMID:26918123

Gibb HJ, Barchowsky A, Bellinger D, Bolger PM, Carrington C, Havelaar AH, et al. 2019. Estimates of the 2015 global and regional disease burden from four foodborne metals - arsenic, cadmium, lead and methylmercury. Environ Res 174:188–94. doi: http:// dx .doi .org/ 10 .1016/ j .envres .2018 .12.062 PMID: 30981404.

Güneş G. 2007. Dioksin ve Furan'ın Oluşum Mekanizmaları ve Giderilme Teknolojileri. Yüksek lisnas tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı. İstanbul.

Heijkenskjöld L, Ernster L. 1975. Studies of the mode of action of erucic acid on heart metabolism. Acta Med Scand 198:75–83.

Hobbs G, Hodgkiss W. 1982. The Bacteriology of Fish Handling and Processing. Developments in Food Microbiology-1. Ed. Davies R. Applied Science publishers. London and New Jersey. 104-105.

Hopkins J. 1995. The glycoalkaloids: naturally of interest (but a hot potato?). Food Chem Toxicol 33(4): 323-328.

İçme F, Çevik Y. 2010. Deli Bal Zehirlenmesi; Olgu Sunumu. Akademik Acil Tıp Olgu Sunumları Dergisi 1(2): 33-36.

Johnson IT. 2000. Brassica Vegetables And Human Health: Glucosinolates in the Food Chain. Acta Hortic 539:39-44.

Karapınar M, Aktuğ Gönül Ş. 1998. Gıda Kaynaklı Mikrobiyal Hastalıklar: Ünlütürk A, Turantaş F. (eds). Gıda mikrobiyolojisi. 1. Baskı. İzmir: Mengi tan Basımevi pp: 109-64.

Karnovsky MJ, and Karnovsky ML. 1961. Metabolic Effects of Lathyrogenic Agents On Cartilage inVivo and in Vitro. J Exp Med 113(2): 381–403.

Kuru M. 1983. Zehirli Balıklar, Ders Notları. Hacettepe Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Ankara.

Lachman J, Hamouz K, Orsák M, Pivec V. 2001. Potato glycoalkaloids and their significance in plant protection and human nutrition - review. Rostl Výr 47: 181-191.

Lajolo FM., Genovese MIS. 2002. Nutritional significance of lectins and enzyme inhibitors from legumes J. Agric. Food Chem 50: 6592.

Liener IE. 1969.Toxic Constituents of Plant Foodstuffs. Food Science and Technology, A. Series of Monographs. Academic Press. New York and London.

Liener IE. 1973. Toxic Factors in Protein Foods. Proteins in Human Nutrition. Ed. J.W.G. Porter and BA Rolls Academic Press, New York and London. pp: 481-500.

Lima ADL, Costa Fortes R, Garbi Novaes MRC, Percário S. 2012. Poisonous mushro-

oms; a review of the most common intoxications. Nutr Hosp 27(2): 402-408.

Lindner E. 1979. Toxikologie der Nahrungsmittel Georg Thieme Verlag. Stuttgart.

Lurie Y, Wasser SP, Taha M, Shehade H, Nijim J, Hoffmann Y, Basis F, Vardi, Lavon O, Suaed S, Bisharat B, Bentur Y. 2009. Mushroom poisoning from species of genus Inocybe (fiber head mushroom): A case series with exact species identification Inocybe mushroom poisoning. Clin Toxicol 47(6): 562–565.

Lust, EB, Barthold C, Malesker MA, Wichman TO. 2011. P Human Health Hazards of Veterinary Medications: Information for Emergency Departments. J Emerg Med 40(2): 198-207.

Ma L, Hu L, Feng X, Wang S. 2018. Nitrate and Nitrite in Health and Disease. Aging Dis 9(5): 938-945.

Maga JA. 1994. Glycoalkaloids in Solanaceae. Food Rev Int 10(4): 385–418.

Marelli M, Conforti F, Araniti F, Statti GA. 2016.Effects of Saponins on Lipid Metabolism: A Review of Potential Health Benefits in the Treatment of Obesity. Molecules 21(1404): 2-20.

Mastovska K. 2013. Modern Analysis of Chemical Contaminants in Food. Food Safety Magazine. Available online at: http://www.foodsafetymagazine. com/magazine-archive1/februarymarch-2013/modern-analysis-of-chemicalcontaminants-in-food/ (Accessed on 21 Aug, 2017).

Mithen RF, Dekker M, Verkerk R, Rabot S, Jhonson IT. 2000. The nutritional significance, biosynthesis and bioavailability of glucosinolates in human foods. J Sci Food Agric 80: 967-984.

Nazar S, Rameshrad M, Hosseinzadeh H. 2017. Toxicological Effects of Glycyrrhiza glabra (Licorice) 31(11): 1635-1650.

Nomeir AA, Abou-Donia MB. 1985. Toxicological effects of gossypol. Chapter Toxicological effects of gossypol, Male Fertility and Its Regulation pp: 111-133.

Nordic Working group on Food Toxicology and Risk Assessment. 1991. Food and New Biotechnology, Novelty, Safety, and Control Aspects of Foods Made by New Biotechnology. Nordic Council of Ministers, Nord.

Omer KA, Mohammed RR, Mohammed Ameen PS, Ali Abas Z, Ekici K. 2021. Presence of Biogenic Amines in Food and Their Public Health Implications: A Review. J Food Protect 84(9): 1539-1548.

Ozcelik F,Temel MC, Ozcelik İK, Kale E.2020. The Role of Biogenic Amines in Nutrition Toxicology: Review. International J Nutr 5(1): 21-29.

Özpalas B, Emir Özer A. 2017. Effects of Caffeine on Human Health. Nevşehir Bilim Teknol Derg 6: 297-305.

Pathak VM, Verma VK, Rawat BS, Kaur B, Babu N, Sharma A, Dewali S, Yadav M, Kumari R, Singh S, Mohapatra A, Pandey V, Rana N, Cunill JM. 2022. Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review. Front Microbiol 13:

962619.

Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food. A joint publication of the Food and Agriculture Organization of the United Nations and the World Health Organization. Geneva: World Health Organization; 2009. Available from: https:// apps .who .int/ iris/ bitstream/ handle/ 10665/ 44065/ WHO EHC 240 eng .pdf [cited 2021 Nov 25].

Rather IA, Koh WY, Paek WK, Lim J. 2017. The sources of chemical contaminants in food and their health implications. Front Pharmacol 17(8): 830.

Russel FE. 1968. Poisonous Marine Animals. The Safety of Foods. Ed. Graham, HD. The Avı PublishingCompany, Inc USA 68-81.

Schrenk D. 2004. Chemical food contaminants. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz 47: 841–877.

Scott HG. 1969. Poisonous Plants and Animals. Food-Borne Infections and Intoxicants. Ed. Riemann, H. Academic Press, New York and London pp: 577-604.

Seneme EF, dos Santos DC, Silva EMR, Franco YEM, Longato GB. 2021. Pharmacological and Therapeutic Potential of Myristicin: A Literature Review. Molecules 26(5914): 3-15.

Sıngleton VL, Kratzer FH. 1969. Toxicity and related physiological activity of phenolic substances of plant origin. J Agr Food Chern 17: 497-512.

Srikanth S, Chen Z. 2016. Plant Protease Inhibitors in Therapeutics-Focus on Cancer Therapy. Front Pharmacol 7: 470.

Stamati PN, Maipas S, Kotampasi C, Stamatis P, Hens L. 2016. Chemical Pesticides and Human Health: The Urgent Need for a New Concept in Agriculture. Front Public Health 18(4): 1-8.

Steyn DG. 1973. Honey. Holecular Structure and Function of Food Carbonhydrate. Ed birch GC, Green LF. Applied Science Publishers Ltd. London pp: 98-101.

Talatay P, Fahey JW. 2001. Phytochemicals from cruciferous plants protect against cancer by modulating carcinogen metabolism. J Nutr 131: 3027-3033.

Taylor JM, Jenner PM, Jones WI. 1965. A comparison of the toxicity of some allyl, propenyl, and propyl compounds in the rat. Toxicol Appl Pharmacol 6: 378-387.

Topal Ş. 1996. Gıda Güvenliği ve Kalite Yönetim Sistemleri. Gebze Kocaeli, 1996: 225.

Tu AT, Gaffield W. 2000. Natural and Selected Toxins: Biological Implications. ACS Symposium Series, No. 745.

Tunail N. 2000. Mikrobiyal Enfeksiyonlar ve İntoksikasyonlar: Gıda Mikrobiyolojisi ve Uygulamaları. 2. Baskı. Ankara: Sim Matbaacılık Ltd. Şti., 81-184.

Ture M, Fentie T, Regassa B. 2019. Veterinary Drug Residue: The Risk, Public Health Significance and its Management College of Veterinary Medicine and Animal Science. Dairy and Vet Sci J 13(2): 555856.

Van Egmont HP. 2004. Natural toxins: risks, regulation and the analytical situation in

Europe. Anal Bioanal Chem 378: 1152–1160.

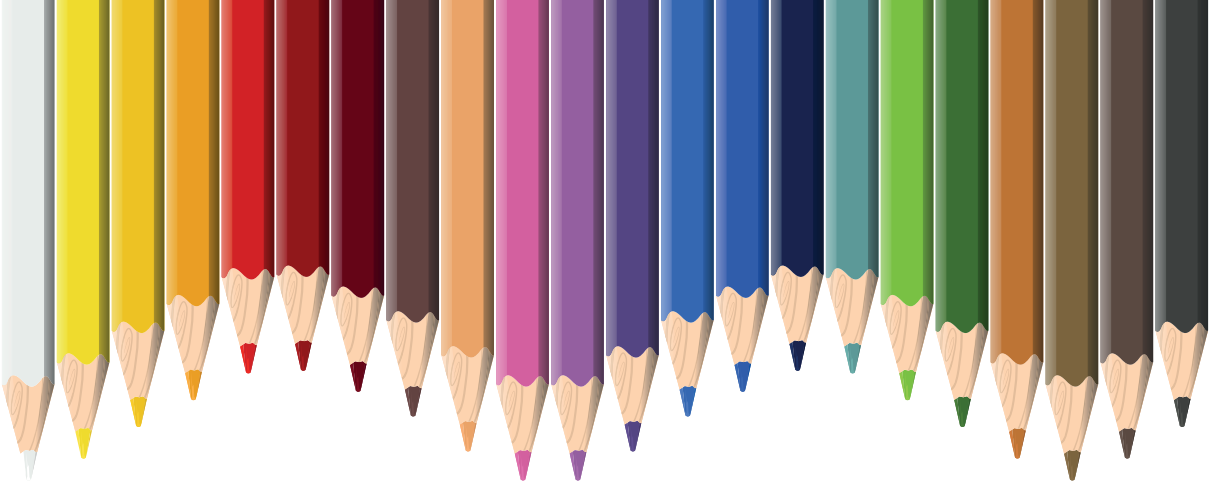
Vasconcelos IM, Oliveria JTA. 2004. Antinutritional properties of plant lectins, Toxicon 44: 385-403.

Vetter J. 2000. Plant cyanogenic glycosides. Toxicon 38: 11-36.

WHO 2020. Natural Toxins in food (Factsheet). Available online: https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/natural-toxins-in-food (accessed on 10 February 2020).

Wilson CL, Droby S. 2001. Microbial Food Contamination. CRC Pres, Boca Raton, p. 290.

Zhou Y, Zhang L, Gui JD, Dong F, Cheng S, Mei X, Zhang LY, Li, YQ, Su XG. 2015. Baldermann, S.; et al. Molecular cloning and characterization of a short chain dehydrogenase showing activity with volatile compounds isolated from *Camellia sinensis*. Plant Mol Biol Rep 33: 253–263.



Bölüm 27

GIDA ALERJİLERİ VE BAĞIRSAK MİKROBİYOTASININ ROLÜ

Tuba ERKAYA KOTAN[1]
Zeynep GÜRBÜZ[2]

1 Doç. Dr. Teknik Bilimler MYO, Gıda İşleme Bölümü/Gıda Teknolojisi Programı
2 Arş. Gör. Dr., Ziraat Fakültesi Gıda mühendisliği Bölümü

1. GİRİŞ

Gıda alerjisi; bir gıdaya karşı tekrarlanabilir şekilde ortaya çıkan spesifik bir bağışıklık tepkisinden kaynaklanan olumsuz bir immünolojik reaksiyon olarak tanımlanmaktadır (Boyce vd., 2011). Bir gıdaya karşı istenmeyen bir reaksiyonun gelişmesi o gıdanın yenmesinden sonra anormal bir reaksiyonun ortaya çıkmasıdır ve bu durum fizyolojik bir tepki olan gıda intoleransına veya immünolojik bir reaksiyon olan gıda aşırı duyarlılığına (alerji) bağlı olabilmektedir (Sampson, 1999). Tiksinmeler olumsuz gıda reaksiyonlarını taklit edebilir, ancak kişi gıdayı bilmeden yediğinde tekrarlanamaz. Gıda intoleransları; toksik kirletici maddeler gibi gıdanın doğasında bulunan faktörlerden kaynaklanabileceği gibi (örneğin, skombroid balık zehirlenmesinde histamin), gıdanın farmakolojik özellikleri (örneğin, olgun peynirlerdeki tiramin), metabolik bozukluklar (örneğin, laktaz eksikliği) veya konakçının özelliklerine bağlı olarak kendine özgü tepkiler olarak meydana gelebilmektedir (Sicherer ve Sampson, 2006). Gıda alerjileri ise kısaca gıda alerjenlerinin neden olduğu aşırı duyarlılık durumunu yansıtmaktadır. Gıda alerjileri tanımlamasını ilk kez bundan 2000 yıl önce inek sütüne karşı olumsuz reaksiyonların olduğunu belirten Hipokrat yapmıştır. Prausnitz ve Kustner ise 1921'de ilk kez balık alerjisi reaksiyonunu tanımlamışlardır (Tekiner vd., 2020).

Gıda alerjileri en sık küçük çocuklarda görülmekte ve immunoglobulin E'ye bağlı (IgE aracılı) veya IgE'den bağımsız (IgE aracısız) T hücreleri bağışıklık mekanizmaları ile açıklanabilmektedir (Sicherer ve Sampson, 2006). Dünya üzerinde yaşayan çocukların yaklaşık %10'u ve yetişkinlerin %4'ü gıda alerjilerine maruz kalmaktadır (Liang vd., 2023). Gıda alerjileri en fazla yaşamın ilk yıllarında görülmekte ve 3 yaşından küçük bebeklerin yaklaşık %6'sını etkilemektedir. Yeni doğan bebeklerin yaklaşık %2.5'inde yaşamın ilk yılında inek sütüne karşı aşırı duyarlılık reaksiyonları görülmekle birlikte bu bebeklerin %80'i beşinci yaşına kadar bu alerjiyi aşabilmektedir (Sampson, 1999). Süt alerjisi reaksiyonlarının yaklaşık %60'ını IgE aracılı reaksiyonlar oluştururken, bebeklerin yaklaşık %25'i duyarlılıklarını yaşamlarının ikinci on yılında da korumakta ve %35'i başka gıda alerjileri edinmeye devam etmektedir (Host vd., 1997). Küçük çocukların yaklaşık %1.5'inin yumurtaya ve %0.5'inin yer fıstığına alerjisi vardır. Bazı çalışmalar yer fıstığı alerjisi yaygınlığının son yirmi yılda arttığını göstermektedir (Grundy vd., 2002). Atopik rahatsızlıkları olan çocuklarda gıda alerjisi görülme sıklığı daha fazladır; orta ila şiddetli atopik dermatiti olan çocukların yaklaşık %35'inde IgE aracılı gıda alerjisi mevcuttur ve astımlı çocukların yaklaşık %6'sında gıda kaynaklı hırıltı görülebilmektedir. Gıda katkı maddelerine karşı ters reaksiyonların da çocukların %0.5 ila %1'ini etkilediği gösterilmiştir (Sampson, 2003).

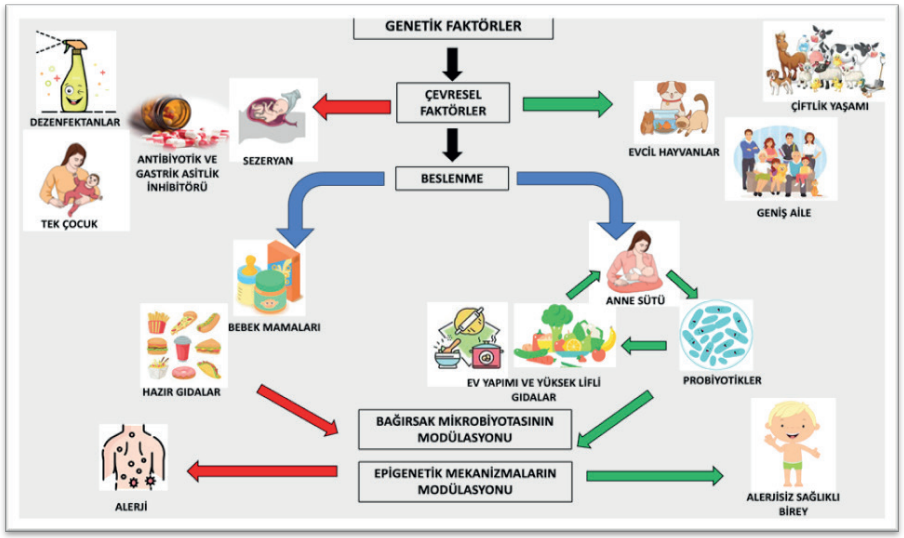
Son yıllarda, iyileşen hijyen koşulları ve yeme alışkanlıklarındaki değişiklikler nedeniyle gıda alerjilerinin önemli ölçüde arttığı ifade edilmektedir

(Sicherer ve Sampson, 2018). Gıda alerjileri yaygınlığı gelişmekte olan ülkelerde de giderek artmaktadır ve sadece genetik faktörlerle açıklanamamaktadır. Avrupa'da yaklaşık yedi milyon insan gıda alerjilerine maruz kalmaktadır ve bu yaygınlık yedi milyarlık dünya nüfusuna yansıtılırsa, 63 milyon ila 1.16 milyar potansiyel gıda alerjisi olan insan anlamına gelmektedir (Fiocchi vd., 2015). Üstelik gıda alerjisi yaşayan kişilerin yaklaşık %8'i, özellikle 0-14 yaş arası çocukların, potansiyel olarak yaşamı tehdit eden ve ölümle sonuçlanan alerjik reaksiyon riskine maruz kaldığı bildirilmektedir (Paparo vd., 2019). Çağdaş yaşam tarzı değişikliklerinin simbiyotik bağırsak mikroorganizmalarını da benzer şekilde değiştirdiği anlamına gelmektedir. Kırsaldan kentsel ortamlara taşınmak, ağırlıklı olarak yüksek lifli bir diyetten yüksek yağ ve proteinli bir diyete geçmek ve sezaryen doğum ile biberonla beslemeyi tercih etmek de dâhil olmak üzere yaşam tarzındaki değişiklikler, bağırsak florasının kompozisyonunu ve dolayısıyla bunun bağışıklık sistemi üzerindeki etkisini belirlemektedir. Orijinal bağırsak florasının kompozisyonunun bozulması (disbiyoz) gıda alerjisinin gelişimi ile ilişkilendirilmiştir (Hooper vd., 2012). Bağırsak florası ile gıda alerjileri arasındaki nedensel ilişki gıda alerjilerinin bağırsak florası tarafından yönetiliyor olabileceğini göstermiştir (Liang vd., 2023). Bireyin beslenme rejimi bağırsak florasını etkileyen önemli bir faktördür. Diyette prebiyotik alımı yalnızca spesifik bakterilerin sayısını arttırmakla kalmaz, aynı zamanda bağırsak mikroorganizmalarını önemli ölçüde düzenleyerek mikroflora kompozisyonunu değiştirir ve kısa zincirli yağ asitleri, triptofan metabolitleri, safra asitleri metabolitleri ve diğer postbiyotikler gibi farklı metabolitler yardımıyla gıda alerjilerinin oluşumunu etkileyen bir fermantasyon substratı olarak da görev yapar. Böylece diyet yoluyla bağırsak florası düzenlenerek gıda alerjileri iyileştirilebilir (Liang vd., 2023).

2. GIDA ALERJİSİ

Gıda alerjisi; yukarda da bahsedildiği gibi genel olarak bağışıklık tolerasının bozulmasından kaynaklanmaktadır. Daha geniş bir ifadeyle gıda alerjisi; genetik, çevre ve genom-çevre etkileşimlerinden kaynaklanabilen ve kısmen epigenetik mekanizmaların aracılık ettiği bağışıklık sistemi işlev bozukluğuna yol açabilen bir sorun olarak ifade edilmektedir (Berni vd., 2015; Paparo vd., 2019). Gıda alerjisinin ortaya çıkmasında pek çok faktörün rolü vardır. Bunlar arasında; cinsiyet, ırk/etnik köken (beyaz çocuklara kıyasla Asyalı ve siyahi çocuklarda artan risk) ve genetik faktörler ön plana çıkmaktadır (Allen ve Koplin, 2016; Du Toit vd., 2016; Gupta vd., 2013). Ek olarak, atopik hastalık belirtileri (komorbid atopik dermatit), artan hijyen, D vitamini eksikliği, omega-3-çoklu doymamış yağ asitleri tüketiminin azalması, antioksidan tüketiminin azalması, antiasitlerin kullanımının artması (alerjenlerin sindirimini azaltır), obezite ve özellikle mikrobiyotanın etkisi gibi gıda alerjilerinin gelişimini tetikleyen risk faktörleri de mevcuttur (Sicherer vd., 2010; Savage vd., 2016). Yaşamın erken dönemlerinde mikrobiyota bileşimindeki değişik-

liklerin, erken konakçı immünolojik gelişiminde önemli bir rol oynadığına ve gıda alerjilerinin oluşumunun altında yatan kritik bir faktörü temsil ettiğine dair artan kanıtlar vardır (Prince vd., 2015).



Şekil 1. *Çeşitli çevresel ve diyet faktörleri, gıda alerjisinin oluşumunu etkileyen tüm faktörler (Paparo vd., 2019)*

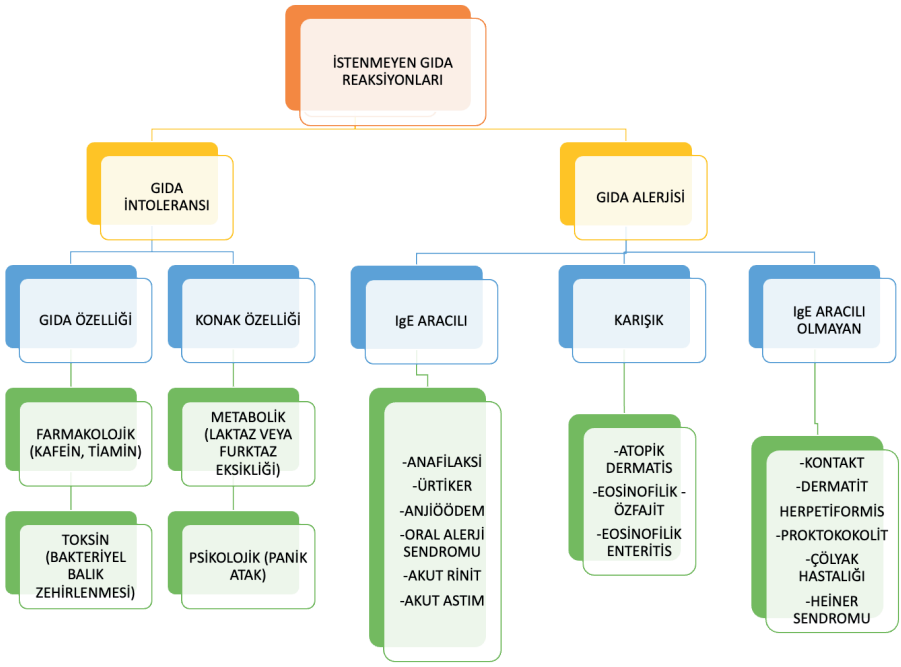
Gıda alerjisi olan pek çok kişi zamanla bu durumu aşmaktadır; ancak doğal seyir büyük ölçüde alerjene neden olan etkene bağlıdır (Paparo vd., 2019). Örneğin, inek sütü ve tavuk yumurtası alerjisi olan çocukların genellikle %50'sinden fazlasında 5-10 yaşına kadar, buğday alerjisi olan çocukların ise %50'sinde 7 yaşına kadar düzelme görülmektedir. Ancak yer fıstığı, ağaç fıstığı ve balık gibi gıdalara olan alerjilerin iyileşme durumu nadirdir ve genellikle kalıcı gıda alerjisi grubunda yer alırlar (Savage vd., 2016). Gıda alerjilerinin tedavisinde Gıda ve İlaç İdaresi (FDA) tarafından onaylanmış bir tedavi yöntemi yoktur. Yalnızca gıda alerjenlerini içeren gıdalardan sıkı ve dikkatli bir diyetle kaçınmak gerekmektedir. Buna ilaveten, kazara alerjen gıdaların tüketilmesi durumunda semptomların antihistaminikler, glukokortikoidler veya epinefrin ile derhal tedavisi önerilmektedir (Paparo vd., 2019). Bununla birlikte, son yıllarda gıda alerjilerini tedavi etmeye yönelik stratejiler geliştirilmiştir. Bunlar; alerjene özgü IgE düzeylerini azaltmaya, alerjene özgü IgG veya IgA düzeylerini arttırmaya, Th_2 efektör hücrelerini baskılamaya veya çeşitli alerjene özgü ve alerjene özgü olmayan stratejiler yoluyla düzenleyici T hücrelerini güçlendirmeye odaklanan stratejilerdir (Berin, 2014). Gıda alerjilerinin tedavisine yönelik genel yeni terapötik perspektifler, alerjene özgü (oral, dil altı, epikütanöz, deri altı immünoterapi ve gıdanın ısıl işleme tabi tutulması) ve alerjene özgü olmayan (insana özgü monoklonal

antikorlar, anti-IgE ve anti-IL5, probiyotikler) tedavileri içermektedir. Alerjene özgü tedaviler, alerjene düzenli maruziyetle birlikte gıda alerjenine karşı reaksiyon eşiğinin artması olarak tanımlanan duyarsızlaştırmayı sağlamada farklı ölçüde başarılıdır. Öte yandan, bugüne kadar bu deneysel tedavilerin hiçbirinin kalıcı bir tolerans veya tedaviyi sağladığı gösterilmemiştir (Burks vd., 2018; Rachid ve Keet, 2018).

2.1. **Oluşum Mekanizması / Patofizyolojisi**

Normal şartlarda vücudun bağışıklık sistemi alerjik maddeler ile tolere ettiği gıdalar arasındaki ayrımı doğru yapmaktadır. Alerjiye neden olan gıdalar sindirim sistemine ağız yoluyla girmekte ve ilk olarak midede sindirilmektedir; burada alerjenite mide asidi nedeniyle zayıflatılmaktadır (Untersmayr ve Jensen-Jarolim, 2008). Gıda bağırsağa girmekte ve alerjen haline gelen ve bağırsağın lamina propriasına çeşitli yollarla (mikro kıvrım ve goblet hücrelerini içeren transselüler yol, paraselüler yol ve CX3C-kemokin reseptörü 1 makrofajlarının luminal süreç yolu) giren küçük moleküllere kadar sindirilmektedir (Mazzini vd., 2014; Chinthrajah vd., 2016). Lamina propriaya girdikten sonra alerjenler, geleneksel antijen sunan hücreler, dendritik hücreler veya geleneksel olmayan antijen sunan hücreler (karaciğer sinüzoidal endotel hücreleri), Kupffer hücreleri veya plazmasitoid dendritik hücreleri tarafından yakalanmakta ve iletilmektedir (Chinthrajah vd., 2016). Bununla birlikte, alerjenler genellikle dendritik hücreler tarafından yakalanmaktadır. Dendritik hücrelerle yüklü alerjenler mezenterik lenf düğümüne girmekte, saf T hücrelerine (Th_0) iletilmekte ve gıda toleransını sağlamaktadır (Mazzini vd., 2014).

Gıda alerjilerinin IgE-aracılı ve IgE-aracılı olmayan ve miks tipleri mevcuttur ve en tehlikeli klinik tablolar IgE-aracılı olan tipinde görülmektedir (Boyce vd., 2011). En yaygın şekliyle gıda alerjisi, mast hücrelerine ve bazofillere bağlanan spesifik IgE antikorlarının, birçok hedef dokuda çok hızlı fizyolojik tepkilere yol açan aracıların salınmasını tetiklediği ani aşırı duyarlılık olarak kendini gösterir (Renz vd., 2018). Buna karşılık, gıda proteini kaynaklı alerjik proktokolit, enterokolit ve eozinofilik özofajit sendromlarının temelinde esas olarak bağırsakta lokalize olan kronik alerjik inflamasyon süreçleri yatmaktadır. Her ne kadar bu durumlardan etkilenen hastalarda gıda alerjenine özgü IgE ara sıra mevcut olsa da inflamasyonun ana itici gücü olarak IgE ile tetiklenen mast hücresi aktivasyonu değil, T hücresi kaynaklı yanıtların olduğu kabul edilmektedir. Tüm bu süreçler içinde kabul edilen bir immünolojik tema, gıdaya özgü toleransın bozulmasıdır (Renz vd., 2018). Enterik bağışıklık sisteminin karşılaştığı temel zorluk, gerekli ve zararsız gıda proteinlerini ve ortakçı enterik mikrobiyotayı, helmint parazitleri de dahil olmak üzere potansiyel olarak zararlı patojenlerden ayırmaktır. Gıda antijenlerinin toleransı ve bunları hedef alan alerjik yanıtların gelişiminin engellenmesi, gıda antijenine özgü düzenleyici T (T_{reg}) hücrelerinin oluşumuna bağlı aktif süreçlerdir (Rivas vd., 2015).



Şekil. 2. *Gıdalara karşı gelişen istenmeyen reaksiyonların sınıflandırılması (Cianferoni, 2020).*

2.1.1. IgE aracılı gıda alerjileri

IgE aracılı gıda alerjisine neden olan en yaygın gıdalar süt, yumurta, yer fıstığı, ağaç yemişleri, deniz ürünleri, soya ve buğdaydır. IgE aracılı gıda alerjisi reaksiyonları gıdaya özgü IgE'den kaynaklanır, anında gerçekleşir ve tekrarlanabilir durumdadır (Cianferoni, 2020).

Alerjenin bağırsak epiteli yoluyla emilmesi ve bağışıklık efektör hücrelerinin bulunduğu mukozaya ve kan dolaşımına erişimi, gıda alerjisi olan kişilerde artmaktadır (Perrier ve Corthesy, 2011). Yutulan gıda alerjenleri, mukozal dokulardaki mast hücreleri ve dolaşımdaki bazofiller üzerinde IgE ve yüksek afiniteli Fc reseptörü (FcεRI; yüksek afiniteli immünoglobulin ε reseptörü (FCER1) olarak da bilinir) ile etkileşime girerek bu hücrelerin aktivasyonuna yol açmaktadır. FcεRI çapraz bağlanması, tirozin protein kinaz ile başlayan ve histamin, triptaz ve kimaz gibi önceden oluşturulmuş aşırı duyarlılık enzimlerini içeren granüllerin ekzositozuna yol açan bir sinyal dizisini tetiklemektedir (Renz vd., 2018). Lökotrienler, prostaglandinler ve trombosit aktive edici faktör (PAF) dahil olmak üzere araşidonik asidin lipid metabolitlerinin de novo sentezi meydana gelmektedir. Bu düşük moleküler kütleli medyatörler; vazodilatasyon, damar geçirgenliğinin artması, kaşıntıya

aracılık eden bazı sinirlerin aktivasyonu ve düz kas daralması gibi bir dizi fizyolojik tepkiyi ortaya çıkarmaktadır (Williams ve Sharma, 2015).

Çizelge 1. *Hedef organın etkilendiği gıda aşırı duyarlılığı (alerjik) reaksiyonları (Renz vd., 2018)*

Hedef Organ	IgE Aracılı Hastalıklar	Ağırlıklı Olarak IgE Aracılı Olmayan Hastalıklar	IgE Aracılı Olmayan Hastalıklar
Cilt	• Genel Ürtiker • Akut Kontakt Ürtiker • Anjiöödem • Kızarma • Eritematöz Morbilliform Döküntü	• Atopik Dermatis	• Kontakt Dermatis • Dermatis Herpetiformis
Akciğerler	• Alerjik Rinokonjonktivit • Akut Bronşit	• Astım	• Gıda Kaynaklı Akciğer Hemosideroz (Heyner Sendromu)
Gastrointestinal Sistem	• Oral Alerji Sendromu	• Eozinofilik Özofajit	• Gıda Proteini Kaynaklı Enterokolit Sendromu • Gıda Proteini Kaynaklı Protokolit Sendromu
	• Akut Gastrointestinal Spazm	• Eozinofilik Gastrik • Eosinofilik Gastroenterit	• Gıda Proteini Kaynaklı Entero Sendromu • Çölyak Hastalığı
Kardiyovasküler Sistem	• Hipotansiyon • Baş Dönmesi veya Bayılma		
Genel Reaksiyon	• Anafilaksi • Gıda ile İlişkili Anafilaksi • Gıda Kaynaklı Anafilaksi		
Diğer	• Rahim Krampı ve Kasılmalar • Anksiyete		

Gastrointestinal sistemdeki bu fizyolojik tepkiler, kaşıntı ve anjiyoödemin (plazma sıvısının mukoza ve cildin derin tabakalarında birikmesi) yanı sıra bağırsak mukozasında kanlanma, mukus salgısında artış ve akut ishal olarak da kendini göstermektedir. Ek olarak, triptaz gibi proteazlar, bradikinin (damar geçirgenliğini artıran bir aracı) üreten komplemanı ve kinin-kallikrein basamaklarını aktive edebilmektedir (Khan ve Kemp, 2011). Tipik

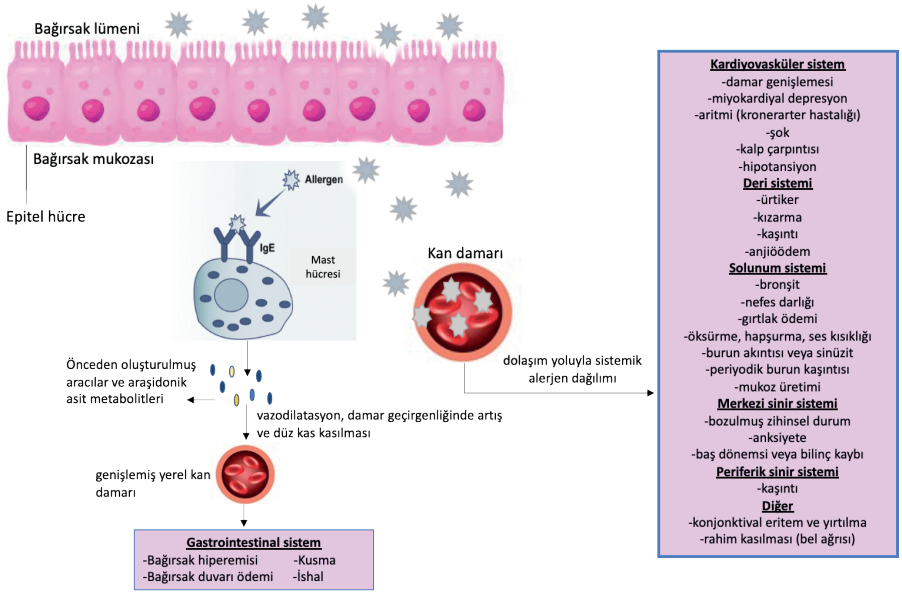
olarak semptomlar gıda alımından birkaç dakika sonra ortaya çıkmakta, ancak daha az sıklıkla birkaç saat sonra da ortaya çıkabilmektedir. Mast hücrelerinin ve bazofillerin alerjen aktivasyonu ayrıca IL-4 ve IL-13 dahil olmak üzere bir dizi sitokinin transkripsiyonunu başlatmaktadır (Burton vd., 2013); bu sitokinler, alerji öncesi Th_2 hücrelerinin hayatta kalmasını desteklemekte ve T_{reg} hücre fonksiyonunu baskılamaktadır. Hem mast hücre degranülasyonu hem de sitokin transkripsiyonu, T_{reg} hücreleri tarafından in vitro olarak baskılanabilmektedir. Bu durum, T_{reg} hücrelerinin yalnızca Th_2 hücrelerinin genişlemesini düzenlemekle kalmayıp aynı zamanda gıda alerjisi olanlarda tolerans indüksiyonu sırasında IgE aracılı mast hücre aktivasyonunu da baskılayabildiğini göstermektedir (Rivas vd., 2015).

Diğer sistemik anafilaksi türlerinden farklı olarak (böcek sokması veya enjekte edilen ilaçlar gibi), gıdalara verilen reaksiyonlar tipik olarak plazma triptaz seviyelerindeki artışlarla ilişkili değildir. Bu nedenle, saptanabilir triptazın yokluğu, gıdaya karşı akut reaksiyon yaşayan bir hastada anafilaksi olasılığını ortadan kaldırmak için yeterli değildir. Bu bulgu muhtemelen bağırsak mukozasında baskın olan mast hücrelerindeki bu proteazın düşük seviyeleri ve bu küçük miktardaki triptazın damar sistemi yoluyla sistemik yayılımının olmaması ile ilgilidir (Renz vd., 2018).

Gıda alerjenleri ve aktive mast hücreleri ve bazofiller tarafından salınan medyatörler, emildiğinde kan dolaşımı yoluyla sistemik olarak uzak dokulara dağıtılmakta olup IgE ile duyarlılaştırılmış bazofiller ve dokudaki yerleşik hücreler bunlara çeşitli şekillerde yanıt vermektedir. Örneğin, histamin ve araşidonik asit metabolitlerinin neden olduğu plazma sızıntısı kurdeşen (plazmanın yüzeysel deride biriktiği ürtiker), anjiyoödem ve hipotansiyonla sonuçlanmaktadır. Bağırsaktaki anjiyoödem, kramp benzeri ağrıya ve tıkanmaya neden olarak kusmaya sebep olabilmektedir. Laringeal ödem, hava yolunun tamamen tıkanmasına ve solunumun durmasına yol açma potansiyeline sahiptir. Gıda alerjenleri arasında yer fıstığı, ağaç yemişleri ve kabuklu deniz ürünleri anafilaksi ile ilişkili en yaygın olarak bilinen gıdalardır, ancak başka gıdalar da ciddi reaksiyonlar meydana getirebilmektedir. Küçük çocuklarda inek sütü ve tavuk yumurtası diğer önemli tetikleyicilerdir. Ayrıca, baskın gıda alerjenlerinde bazı bölgesel farklılıklar görülmektedir; örneğin, Akdeniz havzasında, düşük moleküler kütleli lipid transfer proteinleri (gıdalar arasında yüksek oranda çapraz reaktif olan) içeren meyve ve sebzeler anafilaksinin başlıca nedenidir (Asero vd., 2009). IgE aracılı gıda alerjilerinin tedavisi, alerjenlerden kaçınmayı, kendi kendine enjekte edilebilen epinefrin gibi kurtarma ilaçlarını bulundurmayı ve oral immünoterapiyi içermektedir (Renz vd., 2018).

2.1.2. IgE aracısız gıda alerjileri

IgE aracılı olmayan gıda alerjileri (IgE aracısız gıda alerjileri) dünya çapında giderek artmaktadır. En yaygın IgE aracısız gıda alerjisi Eozinofilik Özofajit (EoE) olarak adlandırılan eozinofilik gastrointestinal bozukluklar, gıda proteininin neden olduğu enterokolit ve gıda proteininin neden olduğu alerjik proktokolittir. Bunlar arasında enterekolit akut bir rahatsızlık iken diğerleri doğası gereği kroniktir. IgE aracısız gıda alerjileri, gıdaya karşı oluşan immünolojik reaksiyonlardır ve ciltte veya serumda gıdaya özgü kanıtlanabilir IgE antikorunun yokluğunda ortaya çıkar, bu nedenle birkaç farklı patojenik mekanizmaya sahip olabilir (Dellon vd., 2013). T hücreleri EoE'de merkezi bir rol oynayabilir, ancak gıda proteininin neden olduğu enterokolit ve gıda proteininin neden olduğu alerjik proktokolitin patogenezi henüz tam olarak anlaşılmış değildir (Cianferoni ve Spergel, 2016; Goswami vd., 2017). EoE, atopik dermatitin deri patolojisine benzemektedir, ancak IgE aracılı ani aşırı duyarlılıktan oldukça farklı kronik bir inflamatuar süreçtir. Bu durum, kademeli olarak başlayan reflü, disfaji (yutma güçlüğü) ve iştahsızlık ile kendini göstermektedir. Genç hastalarda, EoE semptomları gelişme geriliği, beslenme güçlükleri, öğürme, kusma ve yemeğin reddedilmesi şeklinde olur ve inflamatuar kaynaklı reflü ile ilişkili gibi görünürken, ergenler ve yetişkinlerde yutma güçlüğü ve gıda sıkışması gelişir. Başta süt ve buğday olmak üzere aynı zamanda yumurta, baklagiller, et ve soya gibi alerjen gıdalar Th_2 hücrelerini aktive ederek EoE oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır (Cianferoni ve Spergel, 2016; Cianferoni vd., 2018). Araştırmalardaki son gelişmeler, işlevsiz bir epitelyumun, genetik olarak yatkın bireylerde gıda ve çevresel alerjenlere karşı lokal ve muhtemelen sistemik bir Th_2 yanıtının tetiklenmesinde ciddi bir role sahip olabileceğini göstermiştir (Cianferoni ve Spergel, 2016). Aktif EoE'si olan hastalarda, özofagustan sürekli alınan biyopsi örneklerinin daha fazla sayıda T hücresine, değişmez doğal öldürücü hücrelere (natural killer-NK), bazofillere ve mast hücrelerini içerdği görülmüştür (Cianferoni vd., 2020).



Şekil 3. *IgE aracılı gıda alerijileri (Renz vd., 2018)*

2.2. **Epidemiyolojisi**

Dünya genelinde160'tan fazla gıdanın alerjiye neden olduğu bilinmektedir ve yaygınlık oranları belirli gıdalara ve etkilenen popülasyona göre değişmektedir (Sampath vd., 2021). Gıda alerjisi tanısı için kriter standardı olan çift-kör, plasebo kontrollü gıda yüklemelerini kullanan geniş popülasyona dayalı çalışmalar, doğru gıda alerjisi yaygınlık değerlendirmesi için umut vaat etmektedir; ancak bu çalışmalar yoğun kaynak gerektirmekte ve ciddi alerjik reaksiyon riski taşımaktadır. Dolayısıyla gıda alerjisi yaygınlığının doğru belirlenmesi, yoğun kaynak gerektiren bir işlemdir ve yakın tarihli bir uluslararası araştırmada vurgulandığı gibi, kaliteli verilerin kullanılabilirliğini sınırlamaktadır (Prescott vd., 2013). Dünya Alerji Örgütü'ne üye 83 ülke ve üye olmayan altı ülkeyi kapsayan bir araştırmada, bu ülkelerin yarıdan fazlasında gıda alerjisi yaygınlığına ilişkin veri bulunamazken, dörtte birinde hasta/ebeveyn raporuna dayalı verilerin olduğu ve yalnızca %10'unda oral gıda yüklemelerine dayanan gıda alerjisi yaygınlık verilerinin mevcut olduğu ifade edilmiştir (Loh ve Tang, 2018). Tutarlı ve doğru verilerin azlığı, çeşitli çalışmalarda kullanılan tutarsız tanımlar ve metodolojilerle daha da artmaktadır. Şu anda mevcut verilerin çoğunluğu, gıda alerjisi yaygınlığını genellikle üç ila dört kat fazla tahmin eden kişisel raporlara dayanmaktadır. Bunun nedeni hastaların/ebeveynlerin gıdaya karşı diğer olumsuz reaksiyonları (örn. gıda zehirlenmesi, enzim eksiklikleri, kontakt dermatit gibi) gıda alerjisi ile karıştırması olabilmektedir (Loh ve Tang, 2018). Hem gıda yüklemelerine da-

yanan hem de kişinin kendisi tarafından bildirilen verilere bakıldığında tek bir ülkede bildirilen gıda alerjisi oranlarındaki geniş değişkenlik, gerçek yaygınlığın bir ölçüsü olarak kişinin bildirdiği gıda alerjisinin hatalı olduğunu doğrulamaktadır. Örneğin, EuroPrevall çalışmasına kayıtlı 1570 Alman bebeğin kardeşleri arasında ebeveyn tarafından bildirilen gıda reaksiyonlarının yaygınlığı %14.5 iken (McBride vd., 2012); ayrı bir çalışmada ise 739 Alman çocuğun 31'inde (%4.2) gıda yüklemelerine dayanan gıda alerjisini doğruladığı rapor edilmiştir (Roehr vd., 2004)

Gıda alerjisi yaygınlığının belirlenmesinde daha yüksek doğruluk payına sahip olduğu öne sürülen yöntemler, pozitif bir alerjene özgü IgE'nin veya serum sIgE'nin belirlenmesi ile birlikte hastanın gıdaya karşı klinik bir reaksiyon öyküsü varlığının ölçülmesi veya deri prick testi yapılmasına dayanmaktadır (Loh ve Tang, 2018). Bununla birlikte, duyarlı bireylerin çoğunun gıdayı reaksiyon olmadan tolere edebildiğini belirtmesi önemlidir; bu nedenle, reaksiyon geçmişi kişisel bildirime dayanıyorsa bu yaklaşım, gerçek prevalansı yine de olduğundan fazla göstermeye sebep olabilmektedir (Osborne vd., 2011). Dolayısıyla gıda anafilaksisi başvuruları veya acil servise başvurular da yedek önlemler olarak kullanılabilir, ancak bunlar rahatsızlığı farklı tanımlama ve kodlama sorunlarına yol açmaktadır. Özetle, alerji tanımları, çalışma popülasyonları, metodolojiler, coğrafi çeşitlilik, yaş, beslenme şekli ve birçok diğer faktör tahminleri etkilediği için gıda alerjisi prevalansının doğru şekilde belirlenmesi zordur (Sicherer ve Sampson, 2014).

Mevcut yaygınlık verilerinin sınırlamalarına rağmen, bu konuda yapılan çalışmalar sorunun boyutu ve yaygınlığın artmasına katkıda bulunan risk faktörleri hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Çoğu kronik hastalıkta olduğu gibi gıda alerjisi de yaşamın erken dönemlerinde genetik ve çevresel faktörlerin karmaşık etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır. Erkek cinsiyeti, etnik köken, genetik, mikrobiyal maruziyet (iyileştirilmiş hijyen, antibiyotik kullanımı, köpeğe maruz kalma), alerjene maruz kalma (maruziyetin zamanlaması ve yolu, antiasit kullanımı) ve D vitamini yetersizliği dahil olmak üzere hem değiştirilebilir hem de değiştirilemez erken yaşam risk faktörleri tanımlanmıştır (Sicherer ve Sampson, 2018). Artan ekonomik büyüme veya göçün bir sonucu olarak kentleşmiş bir yaşam tarzına doğru bir değişimin, gıda alerjisinin gelişimi ile ilişkili olduğu görülmektedir. Özellikle göç üzerine yapılan çalışmalar, etnik köken ile çevre arasındaki önemli etkileşimi vurgulamaktadır. Avustralya'da, ebeveynleri Doğu Asya kökenli olan 12 aylık bebeklerin, Doğu Asya kökenli olmayan bebeklerle karşılaştırıldığında üç kat daha fazla gıda alerjisi riskine sahip olduğu kaydedilmiştir (Koplin vd., 2014). İnek sütü, yumurta, yer fıstığı, ağaç yemişleri, balık, kabuklu deniz ürünleri, buğday ve soya çoğu ülkede alerjik reaksiyonların çoğunluğunu oluştursa da farklı coğrafi konumlar ve beslenme düzenleri her bir bölgedeki yaygın alerjenler listesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca, reaksiyonlara neden

olan gıda türleri yaş grubuna göre de farklılık gösterir; inek sütü ve yumurta alerjisi küçük çocuklarda daha sık görülürken yer fıstığı, ağaç yemişleri, balık ve kabuklu deniz ürünleri alerjisi daha büyük çocuklarda ve yetişkinlerde daha yaygındır (Nwaru vd., 2014).

Coğrafi bölgeden bağımsız olarak çocuklarda en yaygın gıda alerjileri arasında yer alan inek sütü ve yumurta alerjisi dışında, ABD, Avrupa ve Asya'daki gıda alerjisi vakaları, farklı ülkelerde tüketilen çeşitli diyetleri yansıtacak şekilde oldukça farklıdır. Solunum alerjileri ile çapraz reaksiyonlara bağlı meyve alerjileri Avrupa'da yaygındır (Zuidmeer vd., 2008). Polene bağlı gıda alerjilerinde, ağaç polenine karşı birincil duyarlılık, meyvelerde bulunan homolog alerjen yapılarına karşı çapraz reaksiyona neden olmaktadır. Kuzey Tayland'da çocuklarda gıda alerjisine neden olan ilk beş gıda karides, inek sütü, balık, yumurta ve karınca yumurtası olup karides en yaygın gıda tetikleyicisidir (Lao-araya vd., 2012); Hindistan'da ise nohut, sıklıkla baklagiller içeren tipik Güney Asya diyetini yansıtan önemli bir gıda alerjenidir (Patil vd., 2001). Asya'da şiddetli alerjik reaksiyonlardan sorumlu balık, kabuklu deniz ürünleri, karabuğday, bıldırcın yumurtası ve arı sütü gibi gıdalar Asya diyetinin yaygın ve benzersiz gıdalarındandır. Ülkemizde ise Marmara ve Ege bölgesinde daha çok inek sütü alerjisi görülürken, Karadeniz, Akdeniz, İç Anadolu ve Doğu Anadolu Bölgelerinde ise yumurta alerjisinin görülme sıklığının daha fazla olduğu ifade edilmektedir (Çatak vd., 2021). Kısaca, gıda alerjisi, yalnızca Batılı ülkelerde değil, aynı zamanda gelişmekte olan ülkelerde de artan yaygınlığa sahip olup büyüyen bir sağlık sorunudur. Gıda alerjisi prevalansının stabil hale gelmesi veya düşmesi için hastalığın çözümünü hızlandıracak ve hastalık sıklığını azaltacak stratejilerin gerekli olduğu açıktır.

2.3. **Teşhisi, Önleme ve Tedavi Yöntemleri**

IgE aracılı gıda alerjileri için çift kör plasebo kontrollü gıda testi tanı için altın standarttır (Renz vd., 2018). Tıbbi öykü, gıda alerjisi tanısının merkezinde yer almasına ve doğrulama için gerekli çalışmalara rehberlik etmesi açısından kritik önem taşımasına rağmen, bireylerin ~%30-40'ında yalnızca pozitif bir çift kör plasebo kontrollü gıda testi ile doğrulanabilmektedir (Boyce vd., 2011; Sampson vd., 2014). Bununla birlikte, gıda alerjenlerine karşı klinik yanıtı doğru bir şekilde belirleyen laboratuvar testlerinin yokluğunda, ayrıntılı bir klinik öykü alınması büyük öneme sahiptir ve bu öykü, seçilen laboratuvar çalışmalarının kullanımını ve doğrulayıcı denetimli oral gıda testi ihtiyacını da ortaya koymaktadır. Tanıyı doğrulamak için ağızdan gıda testi yapılması gerekir; tek başına öykü veya laboratuvar bulguları, bir hastaya gıda alerjisi tanısı koymak için yeterli değildir (Boyce vd., 2011; Muraro vd., 2014). Tıbbi geçmiş öyküsü alınırken gıdanın özellikleri (örneğin, pişmiş veya çiğ) ve hastalığa neden olduğundan şüphelenilen miktar gibi sorular sorularak alerijinin tanımlanmasına yardımcı olacak bilgilerin elde edilmesine odaklanılmalıdır. Ek olarak, kapsamlı bir tıbbi öykü, yutma ile semptomların

gelişmesi arasındaki süre, tekrarlanan yutmanın başka durumlarda benzer semptomlara yol açıp açmadığı ve reaksiyonun bu sırada veya buna yakın bir zamanda meydana gelip gelmediği belirlenmelidir. Açıklığa kavuşturulması gereken diğer bir önemli konu ise; reaksiyonun nasıl tedavi edildiği ve son reaksiyonun gerçekleşmesinden bu yana geçen sürenin uzunluğudur (Renz vd., 2018).

Teşhis için ticari ekstraktlar veya taze gıdalar ile yapılan deri prick testleri hastaların mast hücrelerine bağlı gıdaya özgü IgE antikorlarının varlığının taranması için hızlı bir yöntem sunmaktadır. 3 mm'den daha büyük bir kabartıya (kabarık, kırmızı, kaşıntılı bir şişlik) neden olan gıda alerjeni gen ekstraktları veya taze gıdalar pozitif kabul edilir ve hastanın test edilen gıdaya karşı semptomatik reaktivite yaşama olasılığını gösterir (Boyce vd., 2011; Muraro vd., 2014). Genel olarak, kabartı çapı ne kadar büyükse, gıdaya karşı klinik reaktivite ile korelasyonu da o kadar fazladır ve kabarcık çapının 10 mm'den büyük olması alerjik reaksiyon olasılığının yüksek olduğunu göstermektedir (Sampson vd., 2014). Gerçekten de, pediatrik bir çalışmada, inek sütü, tavuk yumurtası veya yer fıstığı ile 8 mm'den büyük kabarcık çapı ortaya çıkaran deri prick testlerinin >%95 oranında öngörücü olduğunu göstermiştir. Deri prick testi dışında gıda alerjilerinin belirlenmesinde; İntradermal Deri Testleri, Atopi Yama Testi, RAST Test (Spesifik IgE Tayini), İntragastral Provakasyon Testi, bağırsak mukozası biyopsisi ve endoskopi gibi laboratuvar testleri de kullanılan diğer teşhis yöntemlerindendir (Çatak vd., 2021). Bunların dışında tanıyı desteklemek için kullanılan diğer birçok tanı testi daha vardır. Ancak, bu testlerden bazıları yalnızca uzmanlaşmış merkezlerde olup birçok ülkede mevcut değildir (McDole vd., 2012).

Gıda aşırı duyarlılığı tanısı konulduktan sonra kanıtlanmış tek tedavi, rahatsız edici alerjenin kesin olarak ortadan kaldırılmasıdır. Hastalar ve aileleri, gıda alerjenlerini kazara almaktan kaçınmak (örneğin gıda etiketlerini okuyarak), alerjik reaksiyonun erken semptomlarını tanımak ve anafilaktik reaksiyonun erken tedavisini başlatmak konusunda eğitilmelidir. Tedavi amacıyla kullanılan antihistaminikler oral alerji sendromunun semptomlarını ve IgE aracılı cilt semptomlarını kısmen hafifletebilmektedir ancak sistemik reaksiyonları engellememektedir (Renz vd., 2018). Oral kortikosteroidler genellikle kronik IgE aracılı bozuklukların (örneğin atopik dermatit veya astım) veya IgE aracılı olmayan gastrointestinal bozuklukların (örneğin alerjik eozinofilik özofajit veya gastroenterit ve diyet kaynaklı enteropati) tedavisinde etkilidir, ancak yan etkilerinden dolayı uzun süreli kortikosteroid kullanımı kabul edilebilir bir durum değildir. IgE aracılı gıda alerjisinin tedavisi için anti-IgE ve yeni immünoterapi formları araştırılmaktadır (Chen vd., 2015). 50 yılı aşkın bir süredir alerji uzmanları tarafından gıda alerjisinin önlenip önlenemeyeceğini tartışılmaktadır. Amerikan Pediatri Akademisi alerji konusunda "yüksek riskli" bebeklerin yalnızca anne sütüyle beslenmesini, em-

ziren annelerin yer fıstığı ve sert kabuklu yemişlerden kaçınmasını (anne sütü yoluyla duyarlılığı önlemek için), katı gıdaya geçişin 6 aya kadar geciktirilmesini ve yer fıstığı, kuruyemiş ve deniz ürünleri gibi başlıca alerjenlerin 3 yaşından sonra tanıtılmasını önermektedir (Renz vd., 2018).

Özetle, gıda alerijleri 3 yaşından küçük çocukların %6'sını ve genel nüfusun yaklaşık %2'sini etkilemektedir ve bu alerijlerin ortaya çıkışının altında çevresel etki ve genetik arasında karmaşık bir etkileşim olduğu açıktır. Bağırsak mikrobiyotası ise çok önemli bir "iç" çevresel maruziyet olarak ortaya çıkmaktadır (Inoue ve Shimojo, 2015). Son yıllarda yapılan çalışmalar gıda alerjileri ile bağırsak mikrobiyotası arasındaki ilişkiyi doğrulamıştır (Wang vd., 2021). Bu durum bağırsak mikrobiyotasının kompozisyonunun ve mikrobiyotayı oluşturan faktörleri etkileyen tüm unsurların gıda alerjilerinin ortaya çıkışında veya tedavisinde rol oynayabileceğini göstermektedir (Liang vd., 2023).

3. GIDA ALERJİSİ VE BAĞIRSAK MİKROBİYOTASI ARASINDAKİ İLİŞKİ

İnsan bağırsağı bakteriler tarafından kolonize edilen en büyük organdır (~10^{14}) ve "bağırsak mikrobiyotası" olarak adlandırılan 1000'den fazla bakteri türünü içermektedir (Noverr ve Huffnagle, 2005). Dizileme teknolojisindeki son gelişmeler, araştırmacıların tüm komensal mikrop türlerinin çeşitliliğini genetik olarak araştırmasına ve açıklığa kavuşturmasına olanak sağlamıştır (Anonymous, 2012). Komensal mikropların kolektif genomlarına hep birlikte "mikrobiyom" adı verilmektedir. Mikrobiyom ve mikrobiyota sıklıkla birbirlerinin yerine kullanılan ve insan vücudunda bulunan komensal, simbiyotik ve patojenik mikroorganizmaların topluluğuna verilen isimdir (Kurtaran, 2021). Son zamanlarda yapılan çalışmalar, geçmişte steril olduğu düşünülen akciğerlerin yanı sıra bağırsak ve derideki mikrobiyomun özelliklerini ortaya koymuştur. Ayrıntılı mekanizmalar belirsiz kalmasına rağmen, mikrobiyotanın/mikrobiyomun, özellikle de bağırsaktakinin, sistemik bağışıklık ve metabolizmayı etkilediği dolayısıyla alerjiler de dâhil olmak üzere çeşitli immünolojik hastalıkların gelişimini etkilediği ileri sürülmüştür (Hooper vd., 2012).

3.1. Hijyen hipotezi

Genetik yatkınlığın bu kadar kısa sürede alerjik hastalıkların görülme sıklığındaki artışı tek başına açıklaması pek mümkün değildir. 1989'da araştırmacılar, alerji hastalarının erken çocukluk döneminde enfeksiyon vakalarının daha düşük olduğunu fark ettikten sonra, iyileştirilmiş sanitasyon uygulamalarına bağlı olarak alerjik hastalıklardaki artışın mikrobiyal maruziyetin yetersiz olmasından kaynaklandığını öne sürerek hijyen hipotezi olarak bilinen bir kavram ortaya atmışlardır. Her ne kadar kanıtlar hala mikroorganizma-konakçı etkileşimlerinin bağışıklık mekanizmalarının düzenlemesin-

de etkili olduğunu destekler nitelikteyken, son veriler hem dış ortamda yaşayan mikropların hem de insan mikrobiyotasının kendisiyle etkileşiminin bu sürecin düzenlenmesinde önemli roller oynadığını göstermektedir (Shu vd., 2019). Daha iyi hijyen uygulamaları nedeniyle bağırsak mikrobiyotasının bozulması ve parazit enfeksiyon oranlarının azalması, Th_2 taraflı bir bağışıklık tepkisine yol açmıştır. Mikrobiyotanın bileşimi dinamiktir ve diyet/yaşam tarzı, antibiyotik kullanımı, doğum şekli, mamayla beslenme, aşılar ve patojenlere maruz kalma gibi dış faktörlerden güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Komensal mikroplara maruz kalma, gebelik kadar erken bir zamanda başlar ve yaşam boyunca devam eder. Bu süreç, bağışıklık sistemini karşılaşılan çok sayıda uyarana nasıl yanıt vereceği konusunda eğitmesi için gereklidir. Bu sürecin herhangi bir kısmındaki bir aksaklık, yalnızca zararlı bulaşıcı mikroorganizmalara değil aynı zamanda polen veya gıda proteinleri gibi zararsız hedeflere de tepki veren bir bağışıklık sisteminin ortaya çıkmasına neden olacaktır. Ling vd. (2014) tarafından yapılan bir araştırmada, gıda alerjisi olan bebeklerle sağlıklı bebekler arasındaki bağırsak mikrobiyotası karşılaştırılmış ve gıda alerjisi olan bebeklerin kendine özgü farklı bir bağırsak mikrobiyotasına sahip olduğu belirlenmiştir. Yine fare modelleri ile yapılan çalışmalarda bağırsak mikrobiyotasının oral toleransta kritik bir rol oynadığı ortaya konmuştur. Buna antibiyotiklerle tedavi edilen veya ortak bir mikrobiyotadan yoksun farelerde daha sonra gıda alerjisi gelişiminin gözlendiği bir başka çalışma güzel bir örnek olarak verilebilir (Stefka vd., 2014). Diğer bir çalışmada ise, temel olarak *Bifidobacterium* ve *Bacteroides*'ten oluşan sağlıklı bebeklerden alınan bağırsak mikrobiyotası nakledilen gnotobiyotik fareler, mikropsuz farelere kıyasla inek sütüne karşı daha az duyarlılık ve alerjik reaksiyonlar sergilemiş, bu da bu bakterilerin gıda alerjilerinin gelişimine karşı koruyucu etkileri olduğunu ortaya koymuştur (Rodriguez vd., 2012). Bu bağlamda, disbiyoz olarak adlandırılan ve mikrobiyotanın çeşitliliğinde ve/veya fonksiyonunda meydana gelen bozulmanın, gıda alerjisinin gelişiminde önemli bir role sahip olduğu söylenebilir (Turcanu vd., 2017).

3.2. Bağırsak Mikrobiyotası

Farelerin ve insanların bağırsak mikrobiyotası, *Proteobakteriler*, *Actinobacteria*, Firmicutes ve *Bacteroidetes*'ler olmak üzere dört ana mikrobiyal grup halinde sınıflandırılabilen yüzlerce farklı filogenetik türden oluşmaktadır. Bu gruplar bağırsak mikrobiyotasının %98'ini oluşturmaktadır (Round ve Mazmanian, 2009). Mikrobiyotanın taksonomik bileşimi de yaşla birlikte değişmektedir. Yeni doğan bağırsak mikrobiyotası başlangıçta Proteobakteriler (örn., *Escherichia, Shigella*) tarafından baskın hale getirilir, ardından Aktinobakteriler (örn. *Bifidobacterium*) gelir ve daha sonra yetişkin benzeri mikrobiyotaya dönüşmeden önce, *Firmicutes* ve *Bacteroidetes*'ler ortama hâkim olur (Blázquez ve Berin, 2017; Shu vd., 2019). Bu durum, Enterobacteriaceae (*Proteobacteria* ve *Actinobacteria*) ve Bacterioidaceae (*Firmicutes*

ve *Bacteroidetes*) arasındaki orana (E/B) yansır. Sezaryenle doğan bebekler, annenin vajinal mikroplarına maruz kalmadıkları için bağırsak mikrobiyotasında farklı bir kolonizasyon modeli gelişmektedir. Elde edilen veriler, sezaryenle doğan bebeklerde daha düşük Bacteroides düzeylerinin, Bacteroidetes grubunda daha düşük bir çeşitliliğin ve Firmicutes grubunda (*Bacillus* ve *Clostridium*) ise daha yüksek düzeyde bir çeşitliliğin mevcut olduğunu ortaya koymaktadır. Erken bebeklik dönemindeki genel mikrobiyal çeşitliliğin düşük olmasının çeşitli klinik çalışmalarda alerjik belirtilerin gelişmesinde etkili olduğu gözlemlenmiştir (Song vd., 2016). Azad vd. (2015) düşük bağırsak mikroorganizma çeşitliliği ve bebeklik döneminde yüksek E/B oranının daha sonraki gıda duyarlılığı ile ilişkili olduğunu bulmuşlardır.

Bebeklik döneminde bağırsak mikrobiyotasının gelişiminde kolostrum ve anne sütü de önemli rol oynamaktadır (Shu vd., 2019). Anne sütü Bifidobacterium, Lactobacillus, Staphylococcus ve Enterococcus gibi mikroorganizmalar için önemli bir besin kaynağı olduğundan emzirme ile çocuğun bağırsak mikrobiyotasının kompozisyonunu etkileyen bu mikroorganizmalar bebeğe aktarılabilmektedir. Antibiyotik kullanımının da bağırsakta yer alan mikroorganizma topluluklarını olumsuz yönde etkilediği gösterilmiştir. Antibiyotikler mevcut mikrobiyal popülasyonun yapısını değiştirebilmekte, böylece çeşitliliklerini azaltmakta, ayrıca genetik özelliklerini ve işlevlerini etkileyebilmektedir (Modi vd., 2014). Antibiyotiklerin bağırsak florası üzerindeki etkileri genellikle tedavi tamamlandıktan sonra uzun süre devam etmektedir. Hamilelik sırasında antibiyotiklere maruz kalmanın çocuklarda alerjik bozukluk riskini artırabildiği ifade edilmektedir. İnsanlar üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen veriler de aynı şekilde antimikrobiyal ajanların kullanımını gıda alerjisi yaygınlığındaki artışla ilişkilendirmektedir. Yenidoğan dönemi antibiyotiklere maruz kalmanın özellikle kritik bir dönemidir. Stefka vd. (2014) yenidoğan antibiyotik tedavisinin dışkı numunelerinde mikrobiyal çeşitliliği ve bakteri yükünü azalttığını ve gıda alerjen duyarlılığını arttırdığını bildirmiştir.

3.3. Probiyotiklerin Etkisi

Genel olarak alerjik hastalıkların ve özel olarak gıda alerjisinin tedavisinde ve önlenmesinde probiyotiklerin rolü henüz kesin değildir. Probiyotikler Dünya Sağlık Örgütü tarafından "yeterli miktarda uygulandığında konakçıya sağlık açısından fayda sağlayan canlı mikroorganizmalar" olarak tanımlanmaktadır (Rachid ve Chatila, 2016). Ancak disbiyozun gıda alerjisinin önde gelen nedeni olduğunu gösteren kanıtların artmasıyla birlikte, probiyotiklerin alerjik semptomlar üzerindeki potansiyel önleyici ve tedavi edici etkileri hem genel kamuoyunun hem de bilim camiasının dikkatini çekmiştir (Virkud vd., 2018). Atopik durumlarda probiyotik kullanımı, probiyotiğin patojen bakterilerin kolonizasyonuna karşı koruma sağlayarak bağırsak bariyerini koruyabilmesi ve alerjenlere duyarlılığı azaltabilmesi ihtimalinden

kaynaklanmaktadır (Shu vd., 2019). Probiyotikler çoğunlukla bakterilerden oluşur, ancak *Saccharomyces boulardii* gibi mayaları da içerebilirler. En yaygın probiyotik bakteriler *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* olmak üzere iki gruba ayrılır. Çok çeşitli tür ve türler vardır. Örneğin *Bifidobacterium longum*, *Bifidobacterium breve* ve *Lactobacilli plantarum*'un hem hayvan modellerinde hem de klinik çalışmalarda anti-alerjik potansiyele sahip olduğu bulunmuştur (Hoarau vd., 2006; Song vd., 2016). Çeşitli probiyotik suşlarının in vivo ve in vitro çalışmalarda gösterilen anti-alerjik etkileri Çizelge 2'de özetlenmiştir. Çalışmalar, probiyotiklerin bağırsak endotel hücrelerine bağlanarak, antimikrobiyal metabolitler üreterek, besinler için patojen mikroorganizmalarla rekabet ederek, epitel bariyerini güçlendirerek, patojenik bakteri büyümesini önlemek için bağırsak ortamını asitleştirerek ve bağışıklık tepkilerini değiştirerek bağışıklık sistemini modüle ettiğini ortaya koymaktadır (Shu vd., 2019). Bu etkiler yoluyla probiyotikler, disbiyoz sonrasında bağırsak mikrobiyotasındaki bakteri hücre sayısını veya epitel tabakasını kısmen yenileyebilmekte ve bu nedenle de yararlı mikroorganizmalar olarak kabul edilmektedirler (Castellazzi vd., 2013).

3.4. Prebiyotik ve Sinbiyotiklerin Etkisi

Prebiyotikler, sindirilmeyen gıda içerikleri olup, bağırsak florasının gelişmesini teşvik eden karbonhidratlardır. Diğer bir deyişle prebiyotikler, "mide-bağırsak mikrobiyotasının hem bileşiminde hem de aktivitesinde spesifik değişikliklere izin veren, konakçının refahı ve sağlığı üzerine yararlı etkileri olan, seçici olarak fermente edilmiş bir bileşen" olarak tanımlanmaktadır (Inoue ve Shimojo, 2015). Prebiyotiklerin belirtilen fizyolojik etkileri gösterebilmesi için 8-40 g/gün alınması gerektiği bildirilmektedir (Sezen, 2013). Fonksiyonel karbonhidratlar temel olarak diyet lifi, fonksiyonel monosakkaritler, fonksiyonel oligosakkaritler ve aktif polisakkaritleri içermekte olup bunlar insan sağlığıyla yakından ilişkilidir ve gıda alerjilerini esas olarak bağırsak florası yoluyla etkisiz hale getirmektedirler. Farklı polisakaritler veya oligosakkaritler, alerjene spesifik IgE antikor üretimini azaltarak veya efektör hücre aktivasyonunu (örn. mast hücreleri) ve Th_2 sitokin ekspresyonunu aşağı doğru düzenleyerek alerji semptomlarını bastırmaktadır (Liang vd., 2023). İnsan sütü prebiyotikler içermekte ve bu maddelerin bağırsaktaki varlığı bazı probiyotik bakterilerin, özellikle de *Bifdobacterium* türlerinin çoğalmasını teşvik etmektedir. Ticari olarak temin edilebilen prebiyotikler arasında fruktooligosakkaritler, inülin, galakto-oligosakkaritler ve soya fasulyesi oligosakkaritleri yer almaktadır (Thomas ve Greer, 2010). Birçok randomize kontrollü çalışma, prebiyotiklerin egzamanın önlenmesinde etkili olduğunu bildirmiştir (Arslanoglu vd., 2008; Grüber vd., 2010; Niele vd., 2013). Ancak prebiyotik takviyelerin diğer alerjik bozuklukların gelişimini önleyici etkisinin olup olmadığı belirsizliğini korumaktadır.

Çizelge 2. *Çeşitli probiyotik suşlarının in vivo ve in vitro çalışmalarda gösterilen anti-alerjik etkileri*

Biyolojik etkiler	Probiyotki bakteri suşu	Referans
Bağırsak bariyeri olgunlaşması	*Bifidobacterium lactis/bifidum*	Sudo vd. (1997)
	Lactobacillus rhamnosus GG	Malin vd. (1997)
Bağışıklık tepkisi modülasyonu Th_1/Th_2 dengesi: Th_1 üretme	*Bifidobacterium lactis/bifidum*	Kim vd. (2008)
	Lactobacillus acidophilus/ reuteri	
	Lactobacillus rhamnosus GG	Maassen vd. (2000)
Bağışıklık tepkisi modülasyonu Th_1/Th_2 dengesi: Th_2 bastırma	*Bifidobacterium bifidum/infantis/ longum*	Niers vd. (2005)
	Lactobacillus acidophilus/ reuteri	
	Lactobacillus rhamnosus GG	Kim vd. (2008)
		Aitoro vd. (2017)
Bağışıklık sistemi düzenlemesi: düzenleyici T (T_{reg}) hücre gelişimi	*Bifidobacterium bifidum/infantis/ lactis)*	Niers vd. (2005)
	Lactobacillus acidophilus/ reuteri/ casei	Maassen vd. (2000)
		Kim vd. (2008)
	Lactobacillus rhamnosus GG	Smits vd. (2005)
Bağışıklık sistemi düzenlemesi: tolerojenik dendritik hücre gelişimi	*Bifidobacterium bifidum*	Niers vd. (2005)
	Lactobacillus reuteri/casei	
	Lactobacillus rhamnosus GG	Braat vd. (2004)
		Smits vd. (2005)
İmmünomodülasyon: IgE üretiminin baskılanması	*Bifidobacterium bifidum/longum*	Kim vd. (2008)
	Bifidobacterium lactis Bb-12	
	Lactobacillus acidophilus	Borthakur vd. (2008)
	Lactobacillus rhamnosus GG	Borchers vd. (2002)
Th_1/Th_2 gen ekspresyonunun epigenetik modülasyonu	*Bifidobacterium breve*	Ghadimi vd. (2012)
	Lactobacillus rhamnosus GG	

Prebiyotik bileşenler içeren yüksek lifli bir diyet, fermantasyon süreci yoluyla bağırsak ortamında bağırsaklara faydalı mikrobiyota tarafından kullanılmakta ve ardından fermantasyon süreci ürünleri olarak veya çevre koşullarına yanıt olarak postbiyotikler olarak bilinen çok çeşitli mikro ve makromoleküller üretilmektedir. Postbiyotik ürünlerin düzenli kullanımının ardından bu bileşikler, konakçı hücrelerle etkileşime girmekte ve bağışıklık sisteminin fonksiyonunu modüle etmektedir. Ayrıca, epitel hücrelerinin bütünlüğünü koruma, gıda alerjenlerinin sistemik dolaşıma erişimini en aza

indirme, alerjik duyarlılaşmaya karşı destek verme ve hem doğrudan hem de dolaylı etki mekanizmaları yoluyla bağışıklık hücreleriyle (dendritik hücreler ve makrofajlar) sinyal gönderme potansiyeline sahiptirler (Stefka vd., 2014; Wesemann ve Nagler, 2016). Ayrıca postbiyotikler, bağırsak mikrobiyal ekosistemine alışılmadık probiyotik türlerini eklemek yerine her konağın endojen probiyotiklerini güçlendirerek bağışıklık toleransının iyileştirilmesinde ve herhangibir yan etkiye yol açmadan olmadan gıda alerjilerinin tedavisinde umut verici bir araç olabilmektedir (Homayouni vd., 2020).

Sinbiyotik, ise probiyotik ve prebiyotiklerin kombinasyonunu ifade etmektedir. Önceki çalışmalar, sinbiyotiklerle tedavinin bağırsak mikrobiyotasını önemli ölçüde değiştirdiğini (Kukkonen vd., 2007; Van Der vd., 2010), ancak bunun infantil egzama gelişimine karşı olumlu önleyici etkilerle sonuçlanmadığını bulmuştur (Van Der vd., 2012). Probiyotiklerin faydalı olabilmeleri canlı organizmalar olarak alınmalarına mı bağlıdır? sorusu son yıllarda üzerinde durulan bir konudur (Inoue ve Shimojo, 2015). Birçok çalışma ısıyla öldürülmüş laktobasil suşlarının farelerde $Th_{1/}Th_2$ dengesini iyileştirdiğini ve IgE üretimini inhibe ettiğini göstermiştir bu da ölü probiyotiklerin immünolojik yanıtları değiştirme kapasitesine sahip olmaya devam ettiğini düşündürmektedir (Sashihara vd., 2006). Bu nedenle alerjik hastalıkların önlenmesinde ölü probiyotiklerin uygulanmasına yönelik ileri çalışmalara ihtiyaç vardır.

3.5. Diğer Anti-Alerjik Faktörlerin Etkisi

Probiyotik ve prebiyotiklerin yanı sıra çoklu doymamış yağ asitleri, antioksidanlar ve D vitamini antialerjik etkiler sunmaktadır (Shu vd., 2019). Çoklu doymamış yağ asitleri inflamatuar süreçlerle yüksek oranda ilişkilidir; örneğin ω-6 yağ asitleri proinflamatuardır, ancak ω-3 ya asitleri sitokin üretimini etkileme yeteneği ile antiinflamatuardır (Calder, 2009). C ve E vitaminleri antioksidan özelliğe sahiptirler ve bunlar oksidatif stresi azaltmanın yanı sıra, dendritik hücreleri uyardıktan sonra fonksiyonel ve fenotipik değişikliklere karşı dirençli hale getirilmektedirler. Bu durum, antioksidanların toleransı tetiklemedeki yararlılığını göstermektedir. Hamilelik sırasında D vitamini alımı, kordon kanında immünoglobulin benzeri transkript ILT3 ve ILT4 genlerinin ekspresyonu ile ilişkilidir. Bu iki genin mRNA düzeylerinin yükselmesi teorik olarak immün toleransı desteklerken, D vitamininin immünomodülatör etkilerini doğrulamak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir (Toh vd., 2012). Pek çok *Lactobacillus* suşunun immünsüpresif etkilerle alerjik semptomları iyileştirdiği gösterildiğinden, gıda alerjisinin tedavisine yönelik ileri araştırmaların bu antialerjik maddeler ve probiyotiklerin sinerjistik etkilerine odaklanması gerekmektedir. Öte yandan terapötik proteinlerin sağlanması için rekombinant probiyotiklerin kullanımı da yaygınlaşmıştır (Inoue ve Shimojo, 2015).

4. SONUÇ

Bağırsak mikrobiyotasının gıdaya karşı bağışıklık toleransının gelişimindeki rolü giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Fare modellerinde bağırsak mikrobiyomunun gıda alerjisi ve toleransında önemli bir rol oynadığına dair önemli kanıtlar olmasına rağmen, insanlar üzerinde yapılan çalışmalar tutarsız bulgulara yol açmıştır. Tanımlanmış bir disbiyotik gıda alerjisi belirtisinin varlığını veya yokluğunu daha fazla değerlendirmek için daha homojen tasarımlara sahip daha büyük çalışmalara ihtiyaç vardır. Ayrıca farklı probiyotiklerin gıda alerjisinin önlenmesi veya tedavisindeki rolünün değerlendirilmesi için bebeklerde daha ileri çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

Aitoro, R., Simeoli, R., Amoroso, A., Paparo, L., Nocerino, R., Pirozzi, C., & Berni Canani, R. (2017). Extensively hydrolyzed casein formula alone or with L. rhamnosus GG reduces β-lactoglobulin sensitization in mice. *Pediatric Allergy and Immunology*, *28*(3), 230-237.

Allen, K.J., Koplin, J.J. (2016). Prospects for prevention of food allergy. J Allergy Clin Immunol Pract, 4, 215–220.

Anonymous, (2012). Human Microbiome Project C Structure, function and diversity of the healthy human microbiome. Nature, 486(7402), 207–214. doi:10.1038/nature11234

Arslanoglu, S., Moro, G. E., Schmitt, J., Tandoi, L., Rizzardi, S., & Boehm, G. (2008). Early dietary intervention with a mixture of prebiotic oligosaccharides reduces the incidence of allergic manifestations and infections during the first two years of life. *The Journal of nutrition, 138*(6), 1091-1095.

Asero, R., Antonicelli, L., Arena, A., Bommarito, L., Caruso, B., Crivellaro, M., & Senna, G. E. (2009). EpidemAAITO: features of food allergy in Italian adults attending allergy clinics: a multi-centre study. Clinical & Experimental Allergy, 39(4), 547-555.

Azad, M. B., Konya, T., Guttman, D. S., Field, C. J., Sears, M. R., HayGlass, K. T., & Child Study Investigators. (2015). Infant gut microbiota and food sensitization: associations in the first year of life. *Clinical & Experimental Allergy*, *45*(3), 632-643.

Berin, M. C. (2014). Future therapies for IgE-mediated food allergy. Current pediatrics reports, 2, 119-126.

Berni Canani, R., Paparo, L., Nocerino, R., Di Scala, C., Della Gatta, G., Maddalena, Y., & Ercolini, D. (2019). Gut microbiome as target for innovative strategies against food allergy. *Frontiers in immunology*, *10*, 191.

Blázquez, A. B., & Berin, M. C. (2017). Microbiome and food allergy. *Translational Research, 179*, 199-203.

Borchers, A. T., Keen, C. L., & Gershwin, M. E. (2002). The influence of yogurt/Lactobacillus on the innate and acquired immune response. *Clinical Reviews in Allergy & Immunology*, *22*, 207-230.

Borthakur, A., Gill, R. K., Tyagi, S., Koutsouris, A., Alrefai, W. A., Hecht, G. A., & Dudeja, P. K. (2008). The probiotic Lactobacillus acidophilus stimulates chloride/hydroxyl exchange activity in human intestinal epithelial cells. *The Journal of nutrition*, *138*(7), 1355-1359.

Boyce, J. A., Assa'ad, A., Burks, A. W., Jones, S. M., Sampson, H. A., Wood, R. A., & Schwaninger, J. M. (2011). Guidelines for the diagnosis and management of food allergy in the United States: summary of the NIAID-sponsored expert panel report. Journal of the American Academy of Dermatology, 64(1), 175-192.

Braat, H., van den Brande, J., van Tol, E., Hommes, D., Peppelenbosch, M., & van Deventer, S. (2004). Lactobacillus rhamnosus induces peripheral hyporesponsiveness in stimulated CD4+ T cells via modulation of dendritic cell function. *The American journal of clinical nutrition*, *80*(6), 1618-1625.

Burks, A. W., Sampson, H. A., Plaut, M., Lack, G., & Akdis, C. A. (2018). Treatment for food allergy. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 141(1), 1-9.

Burton, O. T., Darling, A. R., Zhou, J. S., Noval-Rivas, M., Jones, T. G., Gurish, M. F., & Oettgen, H. C. (2013). Direct effects of IL-4 on mast cells drive their intestinal expansion and increase susceptibility to anaphylaxis in a murine model of food allergy. Mucosal immunology, 6(4), 740-750.

Calder, P. C. (2009). Polyunsaturated fatty acids and inflammatory processes: New twists in an old tale. *Biochimie, 91*(6), 791-795.

Castellazzi, A. M., Valsecchi, C., Caimmi, S., Licari, A., Marseglia, A., Leoni, M. C., & Marseglia, G. L. (2013). Probiotics and food allergy. *Italian Journal of Pediatrics, 39*(1), 1-10.

Chen, C. Y., Lee, J. B., Liu, B., Ohta, S., Wang, P. Y., Kartashov, A. V., & Wang, Y. H. (2015). Induction of interleukin-9-producing mucosal mast cells promotes susceptibility to IgE-mediated experimental food allergy. Immunity, 43(4), 788-802.

Chinthrajah, R. S., Hernandez, J. D., Boyd, S. D., Galli, S. J., & Nadeau, K. C. (2016). Molecular and cellular mechanisms of food allergy and food tolerance. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 137(4), 984-997.

Cianferoni, A. (2020). Non-IgE mediated food allergy. Current pediatric reviews, 16(2), 95-105.

Cianferoni, A., & Spergel, J. (2016). Eosinophilic esophagitis: a comprehensive review. Clinical reviews in allergy & immunology, 50, 159-174.

Cianferoni, A., Ruffner, M. A., Guzek, R., Guan, S., Brown-Whitehorn, T., Muir, A., & Spergel, J. M. (2018). Elevated expression of activated TH2 cells and milk-specific TH2 cells in milk-induced eosinophilic esophagitis. Annals of Allergy, Asthma & Immunology, 120(2), 177-183.

Çatak, J., Demirci, A., & Yaman, M. (2021). Besin Alerjileri ve Mikrobiyota. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (27), 902-910.

Dellon, E. S., Gonsalves, N., Hirano, I., Furuta, G. T., Liacouras, C. A., & Katzka, D. A. (2013). ACG clinical guideline: evidenced based approach to the diagnosis and management of esophageal eosinophilia and eosinophilic esophagitis (EoE). Official journal of the American College of Gastroenterology| ACG, 108(5), 679-692.

Du Toit, G., Tsakok, T., Lack, S., & Lack, G. (2016). Prevention of food allergy. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 137(4), 998-1010.

Fiocchi, A., Pecora, V., Petersson, C. J., Dahdah, L., Borres, M. P., Amengual, M. J., & Di Girolamo, F. (2015). Sensitization pattern to inhalant and food allergens in symptomatic children at first evaluation. *Italian Journal of Pediatrics*, *41*, 1-9.

Ghadimi, D., Helwig, U., Schrezenmeir, J., Heller, K. J., & de Vrese, M. (2012). Epigenetic imprinting by commensal probiotics inhibits the IL-23/IL-17 axis in an in vitro model of the intestinal mucosal immune system. *Journal of leukocyte biology*, *92*(4), 895-911.

Goswami, R., Blazquez, A. B., Kosoy, R., Rahman, A., Nowak-Węgrzyn, A., & Berin, M. C. (2017). Systemic innate immune activation in food protein–induced enterocolitis syndrome. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 139(6), 1885-1896.

Grundy, J., Matthews, S., Bateman, B., Dean, T., & Arshad, S. H. (2002). Rising prevalence of allergy to peanut in children: data from 2 sequential cohorts. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 110(5), 784-789.

Grüber, C., van Stuijvenberg, M., Mosca, F., Moro, G., Chirico, G., Braegger, C. P., & MIPS 1 Working Group. (2010). Reduced occurrence of early atopic dermatitis because of immunoactive prebiotics among low-atopy-risk infants. *Journal of allergy and clinical immunology, 126*(4), 791-797.

Gupta, R., Holdford, D., Bilaver, L., Dyer, A., Holl, J. L., & Meltzer, D. (2013). The economic impact of childhood food allergy in the United States. JAMA pediatrics, 167(11), 1026-1031.

Hoarau, C., Lagaraine, C., Martin, L., Velge-Roussel, F., & Lebranchu, Y. (2006). Supernatant of Bifidobacterium breve induces dendritic cell maturation, activation, and survival through a Toll-like receptor 2 pathway. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, *117*(3), 696-702.

Homayouni, A., Alizadeh, M., Alikhah, H., & Zijah, V. (2012). Functional dairy probiotic food development: trends, concepts, and products. *Probiotics,* 197-212.

Hooper, L. V., Littman, D. R., & Macpherson, A. J. (2012). Interactions between the microbiota and the immune system. Science, 336(6086), 1268-1273.

Host, A., Halken, S., Jacobsen, HP., Eastmann, A., Mortensen, S., Mygil, (1997). S. The natural course of cow's milk protein allergy/intolerance. J Allergy Clin Immunol, 1997(99),490.

Inoue, Y., & Shimojo, N. (2015). Microbiome/microbiota and allergies. In Seminars in immunopathology, 37,57-64, Springer Berlin Heidelberg.

Khan, B. Q., & Kemp, S. F. (2011). Pathophysiology of anaphylaxis. Current opinion in allergy and clinical immunology, 11(4), 319-325.

Kim, J. Y., Choi, Y. O., & Ji, G. E. (2008). Effect of oral probiotics (Bifidobacterium lactis AD011 and Lactobacillus acidophilus AD031) administration on ovalbumin-induced food allergy mouse model. *Journal of microbiology and biotechnology*, *18*(8), 1393-1400.

Koplin, J. J., Peters, R. L., Ponsonby, A. L., Gurrin, L. C., Hill, D., Tang, M. L. K., & HealthNuts Study Group. (2014). Increased risk of peanut allergy in infants of A sian-born parents compared to those of A ustralian-born parents. Allergy, 69(12), 1639-1647.

Kukkonen, K., Savilahti, E., Haahtela, T., Juntunen-Backman, K., Korpela, R., Poussa, T., & Kuitunen, M. (2007). Probiotics and prebiotic galacto-oligosaccharides in the prevention of allergic diseases: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Journal of Allergy and Clinical Immunology, 119*(1), 192-198.

Kurtaran, B. (2021). Mikrobiyom ve mikrobiyota. Ege Tıp Dergisi, 88-93.

Lao-araya, M., & Trakultivakorn, M. (2012). Prevalence of food allergy among preschool children in northern Thailand. Pediatrics International, 54(2), 238-243.

Liang, J., Zheng, B., Zhang, Y., & Zeng, H. (2023). Food allergy and gut microbiota. Trends in Food Science & Technology, 104141.

Ling, Z., Li, Z., Liu, X., Cheng, Y., Luo, Y., Tong, X., & Xiang, C. (2014). Altered fecal microbiota composition associated with food allergy in infants. *Applied and environmental microbiology*, *80*(8), 2546-2554.

Loh, W., & Tang, M. L. (2018). The epidemiology of food allergy in the global context. International journal of environmental research and public health, 15(9), 2043.

Maassen, C. B., van Holten-Neelen, C., Balk, F., den Bak-Glashouwer, M. J. H., Leer, R. J., Laman, J. D., & Claassen, E. (2000). Strain-dependent induction of cytokine profiles in the gut by orally administered Lactobacillus strains. *Vaccine*, *18*(23), 2613-2623.

Malin, M., Verronen, P., Korhonen, H., Syväoja, E. L., Salminen, S., Mykkänen, H., & Isolauri, E. (1997). Dietary therapy with Lactobacillus GG, bovine colostrum or bovine immune colostrum in patients with juvenile chronic arthritis: evaluation of effect on gut defence mechanisms. *Inflammopharmacology*, *5*, 219-236.

Mazzini, E., Massimiliano, L., Penna, G., & Rescigno, M. (2014). Oral tolerance can be established via gap junction transfer of fed antigens from CX3CR1(+) macrophages to CD103(+) dendritic cells. Immunity, 40(2), 248–261.

McBride, D., Keil, T., Grabenhenrich, L., Dubakiene, R., Drasutiene, G., Fiocchi, A., & Beyer, K. (2012). The EuroPrevall birth cohort study on food allergy: baseline characteristics of 12,000 newborns and their families from nine European countries. Pediatric Allergy and Immunology, 23(3), 230-239.

McDole, J. R., Wheeler, L. W., McDonald, K. G., Wang, B., Konjufca, V., Knoop, K. A., ... & Miller, M. J. (2012). Goblet cells deliver luminal antigen to CD103+ dendritic cells in the small intestine. Nature, 483(7389), 345-349.

Modi, S. R., Collins, J. J., & Relman, D. A. (2014). Antibiotics and the gut microbiota. *The Journal of clinical investigation*, *124*(10), 4212-4218.

Muraro, A., Werfel, T., Hoffmann-Sommergruber, K., Roberts, G., Beyer, K., Bindslev-Jensen, C., & EAACI Food Allergy and Anaphylaxis Guidelines Group. (2014). EAACI food allergy and anaphylaxis guidelines: diagnosis and management of food allergy. Allergy, 69(8), 1008-1025.

Niele, N., van Zwol, A., Westerbeek, E. A., Lafeber, H. N., & van Elburg, R. M. (2013). Effect of non-human neutral and acidic oligosaccharides on allergic and infectious diseases in preterm infants. *European journal of pediatrics, 172*, 317-323.

Niers, L. E., Timmerman, H. M., Rijkers, G. T., van Bleek, G. M., van Uden, N. O., Knol, E. F., & Hoekstra, M. O. (2005). Identification of strong interleukin-10 inducing lactic acid bacteria which down-regulate T helper type 2 cytokines. *Clinical & Experimental Allergy*, *35*(11), 1481-1489.

Noverr, M. C., & Huffnagle, G. B. (2005). The 'microflora hypothesis' of allergic diseases. Clinical & Experimental Allergy, 35(12), 1511-1520.

Nwaru, B. I., Hickstein, L., Panesar, S. S., Roberts, G., Muraro, A., Sheikh, A., & EAACI Food Allergy and Anaphylaxis Guidelines Group. (2014). Prevalence of common food allergies in Europe: a systematic review and meta-analysis. Allergy, 69(8), 992-1007.

Osborne, N. J., Koplin, J. J., Martin, P. E., Gurrin, L. C., Lowe, A. J., Matheson, M. C., & HealthNuts Investigators. (2011). Prevalence of challenge-proven IgE-mediated food allergy using population-based sampling and predetermined challenge criteria in infants. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 127(3), 668-676.

Paparo, L., Nocerino, R., Di Scala, C., Della Gatta, G., Di Costanzo, M., Buono, A., & Berni Canani, R. (2019). Targeting food allergy with probiotics. Probiotics and Child Gastrointestinal Health: Advances in Microbiology, Infectious Diseases and Public Health Volume 10, 57-68.

Patil, S. P., Niphadkar, P. V., & Bapat, M. M. (2001). Chickpea: a major food allergen in the Indian subcontinent and its clinical and immunochemical correlation. Annals of Allergy, Asthma & Immunology, 87(2), 140-145.

Perrier, C., & Corthesy, B. (2011). Gut permeability and food allergies. Clinical & Experimental Allergy, 41(1), 20-28.

Prescott, S. L., Pawankar, R., Allen, K. J., Campbell, D. E., Sinn, J. K., Fiocchi, A., & Lee, B. W. (2013). A global survey of changing patterns of food allergy burden in children. World Allergy Organization Journal, 6, 1-12.

Prince, B. T., Mandel, M. J., Nadeau, K., & Singh, A. M. (2015). Gut microbiome and the development of food allergy and allergic disease. Pediatric Clinics, 62(6), 1479-1492.

Rachid, R., & Chatila, T. A. (2016). The role of the gut microbiota in food allergy. *Current opinion in pediatrics, 28*(6), 748-753.

Rachid, R., & Keet, C. A. (2018). Current status and unanswered questions for food allergy treatments. The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice, 6(2), 377-382.

Renz, H., Allen, K. J., Sicherer, S. H., Sampson, H. A., Lack, G., Beyer, K., & Oettgen, H. C. (2018). Food allergy. Nature reviews Disease primers, 4(1), 1-20.

Rivas, M. N., Burton, O. T., Wise, P., Charbonnier, L. M., Georgiev, P., Oettgen, H. C., & Chatila, T. A. (2015). Regulatory T cell reprogramming toward a Th2-cell-like lineage impairs oral tolerance and promotes food allergy. Immunity, 42(3), 512-523.

Rodriguez, B., Prioult, G., Hacini-Rachinel, F., Moine, D., Bruttin, A., Ngom-Bru, C., & Waligora-Dupriet, A. J. (2012). Infant gut microbiota is protective against cow's milk allergy in mice despite immature ileal T-cell response. *FEMS microbiology ecology*, *79*(1), 192-202.

Roehr, C. C., Edenharter, G., Reimann, S., Ehlers, I., Worm, M., Zuberbier, T., & Niggemann, B. (2004). Food allergy and non-allergic food hypersensitivity in children and adolescents. Clinical & Experimental Allergy, 34(10), 1534-1541.

Round, J. L., & Mazmanian, S. K. (2009). The gut microbiota shapes intestinal immune responses during health and disease. *Nature reviews immunology*, *9*(5), 313-323.

Sampath, V., Abrams, E. M., Adlou, B., Akdis, C., Akdis, M., Brough, H. A., & Renz, H. (2021). Food allergy across the globe. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 148(6), 1347-1364.

Sampson, H. A. (1999). Food allergy. Part 1: immunopathogenesis and clinical disorders. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 103(5), 717-728.

Sampson, H. A. (2003). 9. Food allergy. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 111(2), S540-S547.

Sampson, H. A., Aceves, S., Bock, S. A., James, J., Jones, S., Lang, D., & Wallace, D. (2014). Food allergy: a practice parameter update—2014. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 134(5), 1016-1025.

Sashihara, T., Sueki, N., & Ikegami, S. (2006). An analysis of the effectiveness of heat-killed lactic acid bacteria in alleviating allergic diseases. *Journal of Dairy Science, 89*(8), 2846-2855.

Savage, J., Sicherer, S., & Wood, R. (2016). The natural history of food allergy. The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice, 4(2), 196-203.

Sezen, A. G. (2013). Prebiyotik, probiyotik ve sinbiyotiklerin insan ve hayvan sağlığı üzerine etkileri. *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi, 8*(3), 248-258.

Shu, S. A., Yuen, A. W., Woo, E., Chu, K. H., Kwan, H. S., Yang, G. X., & Leung, P. S. (2019). Microbiota and food allergy. *Clinical reviews in allergy & immunology*, *57*, 83-97.

Sicherer, S. H., & Sampson, H. A. (2006). 9. Food allergy. Journal of allergy and clinical immunology, 117(2), S470-S475.

Sicherer, S. H., & Sampson, H. A. (2014). Food allergy: epidemiology, pathogenesis, diagnosis, and treatment. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 133(2), 291-307.

Sicherer, S. H., & Sampson, H. A. (2018). Food allergy: a review and update on epidemiology, pathogenesis, diagnosis, prevention, and management. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 141(1), 41-58.

Sicherer, S. H., Muñoz-Furlong, A., Godbold, J. H., & Sampson, H. A. (2010). US prevalence of self-reported peanut, tree nut, and sesame allergy: 11-year follow-up. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 125(6), 1322-1326.

Smits, H. H., Engering, A., van der Kleij, D., de Jong, E. C., Schipper, K., van Capel, T. M., & Kapsenberg, M. L. (2005). Selective probiotic bacteria induce IL-10–producing regulatory T cells in vitro by modulating dendritic cell function through dendritic cell–specific intercellular adhesion molecule 3–grabbing nonintegrin. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, *115*(6), 1260-1267.

Song, H., Yoo, Y., Hwang, J., Na, Y. C., & Kim, H. S. (2016). Faecalibacterium prausnitzii subspecies–level dysbiosis in the human gut microbiome underlying atopic dermatitis. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, *137*(3), 852-860.

Song, S., Lee, S. J., Park, D. J., Oh, S., & Lim, K. T. (2016). The anti-allergic activity of Lactobacillus plantarum L67 and its application to yogurt. *Journal of dairy science, 99*(12), 9372-9382.

Stefka, A. T., Feehley, T., Tripathi, P., Qiu, J., McCoy, K., Mazmanian, S. K., & Nagler, C. R. (2014). Commensal bacteria protect against food allergen sensitization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(36), 13145-13150.

Sudo, N., Sawamura, S. A., Tanaka, K., Aiba, Y., Kubo, C., & Koga, Y. (1997). The requirement of intestinal bacterial flora for the development of an IgE production system fully susceptible to oral tolerance induction. *Journal of immunology (Baltimore, Md.: 1950)*, *159*(4), 1739-1745.

Tekiner, İ. H., Murat, A. Y., & Mutlu, H. (2020). Bir gıda güvenliği ve sağlık sorunu: balık ve balık ürünleri kaynaklı alerjenler. Aydın Gastronomy, 4(1), 1-9.

Thomas, D. W., Greer, F. R., & Committee on Nutrition; Section on Gastroenterology, Hepatology, and Nutrition. (2010). Probiotics and prebiotics in pediatrics. *Pediatrics*, *126*(6), 1217-1231.

Toh, Z. Q., Anzela, A., Tang, M. L., & Licciardi, P. V. (2012). Probiotic therapy as a novel approach for allergic disease. *Frontiers in pharmacology, 3*, 171.

Turcanu, V., Brough, H. A., Du Toit, G., Foong, R. X., Marrs, T., Santos, A. F., & Lack, G. (2017). Immune mechanisms of food allergy and its prevention by early intervention. *Current opinion in immunology*, *48*, 92-98.

Untersmayr, E., & Jensen-Jarolim, E. (2008). The role of protein digestibility and antacids on food allergy outcomes. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 121 (6), 1301–1308.

Van Der Aa, L. B., Heymans, H. S., Van Aalderen, W. M., Sillevis Smitt, J. H., Knol, J., Ben Amor, K., & Synbad Study Group. (2010). Effect of a new synbiotic mixture on atopic dermatitis in infants: a randomized-controlled trial. *Clinical & Experimental Allergy, 40*(5), 795-804.

Van der Aa, L. B., Lutter, R., Heymans, H. S. A., Smids, B. S., Dekker, T., Van Aalderen, W. M. C., & Synbad Study Group. (2012). No detectable beneficial systemic immunomodulatory effects of a specific synbiotic mixture in infants with atopic dermatitis. *Clinical & Experimental Allergy, 42*(4), 531-539.

Virkud, Y. V., Wang, J., & Shreffler, W. G. (2018). Enhancing the safety and efficacy of food allergy immunotherapy: a review of adjunctive therapies. *Clinical reviews*

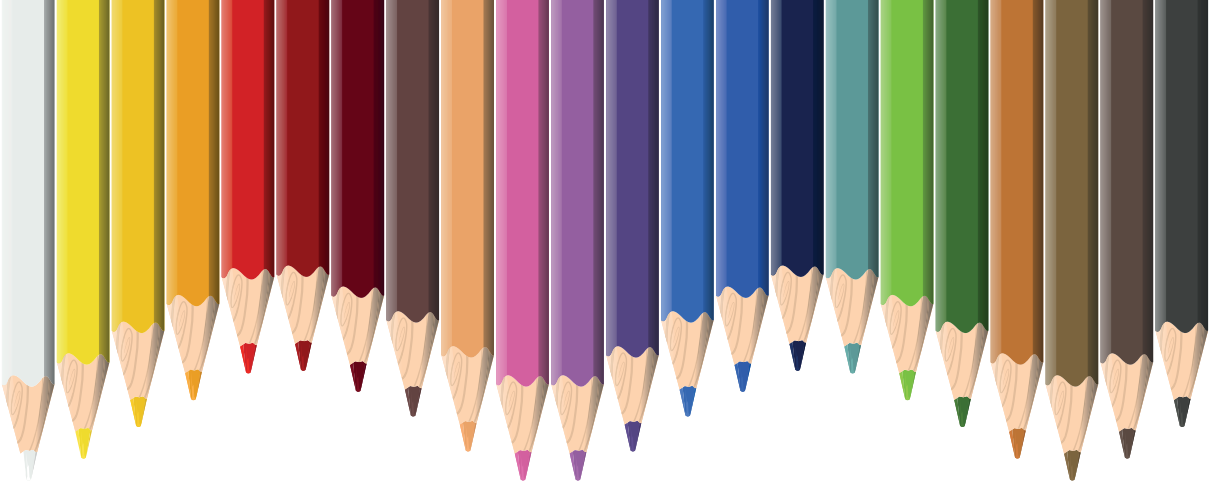
in allergy & immunology, 55, 172-189.

Wang, Z., Zhong, J., Meng, X., Gao, J., Li, H., Sun, J., & Chen, H. (2021). The gut microbiome-immune axis as a target for nutrition-mediated modulation of food allergy. Trends in Food Science & Technology, 114, 116-132.

Wesemann, D. R., & Nagler, C. R. (2016). The microbiome, timing, and barrier function in the context of allergic disease. *Immunity, 44*(4), 728-738.

Williams, K. W., & Sharma, H. P. (2015). Anaphylaxis and urticaria. Immunology and Allergy Clinics, 35(1), 199-219.

Zuidmeer, L., Goldhahn, K., Rona, R. J., Gislason, D., Madsen, C., Summers, C., & Keil, T. (2008). The prevalence of plant food allergies: a systematic review. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 121(5), 1210-1218.



Bölüm 28

DUVAR KAROSU MAT SIR REÇETLERİNDE UÇUCU KÜL KATI ATIK KATKISININ KİMYASAL DAYANIM ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ*

Yiğit BALBAĞ[1]

Hale YILDIZAY[2]

Eda TAŞÇI[3]

1 Yiğit BALBAĞ, Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi, BİEN Seramik, 1.Organize sanayii, Bilecik, TÜRKİYE, ybalbag@gmail.com, ORCID: 0009-0007-7997-1158

2 Dr.Öğr. Üyesi. Hale YILDIZAY, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Güzel Sanatlar Meslek Yüksek Okulu, Çini sanatı ve Tasarımı Bölümü, Germiyan Kampüs, 43100 Kütahya, TÜRKİYE, hale.yildizay@dpu.edu.tr, Orcid no: 0000-0002-3896-9912

3 Prof. Dr., Eda TAŞÇI, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Merkez Kampüs, 43100 Kütahya, TÜRKİYE, eda.tasci@dpu.edu.tr, Orcid no: 0000-0003-3346-8833

Endüstriyel Atıkların Duvar Karosu Mat Sır Reçetelerinde Renklendirici Pigment Olarak Kullanımı (Yüksek Lisans Tezinden Düzenlenmiştir.)

Yazar: Yiğit BALBAĞ

ORTAK DANIŞMAN: Dr.Öğr. Üyesi. Hale YILDIZAY

Danışman: PROF. DR. Eda TAŞÇI

Yer Bilgisi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 10530240 Referans Nolu Tez

Seramik ürünlerin üretilmesi önemli zanaat/meslek dallarından biridir. Tarihsel süreçte seramik; zanaat, sanat ve endüstriyel sanayii bazında gelişimini sürdürmektedir. Üretim şekli, enerji kullanımının gerekliliği, mühendislikte geleneksel üretim yöntemlerine karşılık teknolojik alternatiflerin bulunması, gelişen teknoloji ve artan nüfus nedeniyle üretim hızında artış olmuştur. Seramik üretiminde karşı karşıya kalınan bu artış, üretimde farklılıklar oluşturmayı zorunlu kılmıştır. Böylece seramik sanayiinde yapılan AR-GE çalışmalarında farklı katı atıkların değerlendirilmesi, maliyet azaltılması, hammaddelerin en ekonomik şekilde kullanımı, enerji tüketiminin kontrolü, çevre kirliliğinin azaltılması gibi pek çok konuyu kapsamaktadır.

Duvar yüzeylerini kaplamak ve dekoratif bir görünüm sağlamak için kullanılan duvar karoları banyo, mutfak, oturma odası ve diğer iç mekanlarda duvarları kaplamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Duvar karoları yüzeyleri sırlanarak veya sırsız şekilde pişirildikten sonra kullanılan uzun ömürlü ve dayanıklı kaplama malzemeleridir. Çok farklı yüzey özelliklerine ve renk dağılımına sahip duvar karosu sırları, cam yapıcılar, ergiticiler ve dengeleyicilerin bir arada kullanımından oluşmaktadırlar. Endüstride yaygın olarak kullanılan sır çeşitleri transparan, opak ve mat sırlardır.

Duvar karosu sektöründe koyu renkli mat sırlar günümüzde (katma değeri yüksek ürünler olarak) oldukça talep görmektedir. Yapı dekorasyonun önemli elemanlarından biri olan talep gören sırlı seramik kaplama malzemeleri, kırılma ve yıpranma gibi nedenler dışında, moda ve estetik özellikler üzerinden talep görmektedir.

Bir mekanda, farklı renk, desen ve boyutlarda duvar ve yer karosunu kaplama malzemesi kullanmak mekana dekoratif bir görüntü sağlamak ve duvarları kullanılan kimyasallara, sıcak, soğuk, nem, darbe ve aşınma gibi etkenlere karşı korumak amacıyla kullanılan seramik ve fayans malzemeleri duvar karosu olarak tanımlanabilir. Geniş bir kullanım alanına sahip olan duvar karoları çoğunlukla banyo, mutfak, oturma odası gibi iç mekanlarda tercih edilmektedir.

Bu malzemenin kullanım alanına göre seçiminde estetik kaygılar, nem, su ve lekelere karşı koruma amacı, mekanın uzun ömürlülüğü ve kolay temizlenirliği gibi özelliklere dikkat edilmektedir. Popüler bir zemin kaplama malzemesi olarak tercih edilen seramik karolar; çatlama, aşınma ve çizilmelere karşı dayanıklı bir özellik göstermektedirler.

Ayrıca sırlı seramik karoların su geçirmez ve leke tutmaz özellikleri kolayca temizlenebilme özelliği sağlamaktadır. Günümüzde dijital teknolojilerdeki ilerleme sayesinde de her türlü renk, desen ve doku ile estetik çeşitliliğe ulaşılmaktadır. Seramik karolar yine gelişen çeşitli teknolojiler sayesinde, antibakteriyel, antifungal, kaymaz zeminler, nefes alabilen özellik gibi pek çok çevreye dost duyarlı özellik kazandırılabilirler.

Duvar karosu sırları, karoların yüzeylerine uygulanan yüzeye parlaklık, renk ve desen tasarımı eklemek için kullanılan cam bir kaplama tabakasıdır. Seramik ürünlerde elde ettiğimiz yüzeyin ürüne sağladığı özellikler; dekoratif bir kaplama özelliği, kolay temizlenebilir bir yüzey, fiziksel ve mekaniksel hasarlara karşı korunan bir yüzey, asit ve bazlara karşı dayanıklı bir yüzey elde etmek, görsel açıdan ürüne değer kazandırmak, renkli bünyelere sahip seramiklere koruyucu bir tabaka oluşturmaktır. Seramik sır uygulamasında dikkate alınması gerekli iki parametre vardır. Bunlardan biri bünye sır uyumudur. Bünye sır uyumunda termal genleşme katsayısı farklılığı oluştuğunda sır ve bünyede gerilmeler oluşmaktadır. Örneğin belli bir sıcaklık da sıcaklığın artmasına bağlı olarak malzemede atomlar arasındaki titreşime bağlı olarak boyutsal değişim gerçekleşmektedir. Atomlar arasındaki bağ kuvveti arttıkça termal katsayısı artmaktadır (Bauerle, 1969). Sır genleşmesi, bünye genleşmesinden büyükse, sır çekme gerilmeleri altında, Sır genleşmesi, bünye genleşmesinden küçükse sır basma gerilmesi altında kalacak ve sırda çatlamalar oluşabilecektir. Sırda çatlamanın görülmemesi için sırda çekme gerilmesinin fazla olması beklenmektedir. Sırda zamana bağlı olarak da silikat bünyelerde oluşan genleşme nedeniyle sır çatlakları meydana gelebilir. Bu nedenle üretim esnasında sırda basma gerilmesini artırıcı, nem genleşmesini azaltıcı oksitlerin varlığı tercih edilebilir.

Sır üretiminde dikkat çeken diğer bir parametre ise renk oluşumu reçeteye uygun pigment seçimi gibi parametrelerdir. Camsı matris yapı içerisinde renkli bir sır tabakası elde etmek için, çözünmeyen renkli kristal yapıya sahip pigmentleri camsı matris yapı içerisinde homojen dağılımı ile sır renklendirmesi sağlanmaktadır.

Sır oluşumunda içerdiği hammadde reçete özelliğine bağlı olarak, cam faz içerisine gömülmüş kristal yapıları içermesinden dolayı ve ergimiş sırın soğuma sırasındaki sır taneciklerinin ufalmasıyla sahip olunan bu kristal yapılar kırılma ve yayılmaya uğrarlar. Böylelikle sırlanmış karoların yüzeyinde mat bir görünüm oluşur. Mat özellikli bir sır elde etmek için üretilen mat frit reçetelerinde kuvars, borik asit, mermer, albit, çinko oksit, boraks, zirkon, baryum karbonat, potasyum nitrat ve alümina gibi hammaddeler kullanılmaktadır (Arcasoy, 1983; Taçyıldız, 2018).

Çeşitli endüstri alanlarında üretim sonrasında katı ve sıvı atıklar ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların üretim yapan sektöre kimyasal bir etkisi olmamasına rağmen çeşitli problemler çıkardığı görülmektedir. Örneğin depolandığı bölgede görüntü kirliliği yaratması, o bölgede ekolojik dengenin bozulmasına sebep olması gibi çeşitli sorunlar. Sektörlerin ortaya çıkardığı katı atıklara örnek olarak; termik santrallerden elde edilen uçucu küller, kurşun-bakır-çinko üretim fabrikalarındaki cüruflar, demir çelik fabrikalarından elde edilen cüruflar, arıtma kekleri, mermer kesim atıkları vb. olarak sayılabilir. Sanayi katı atıklarının içerdikleri bazı zararlı ya da zararsız maddelerin işlemden

geçirilerek tekrar kullanılabilir hale getirilmesi yönünde birçok çalışma yapılmaktadır. Bu atıklar seramik sektöründe pigment ve sır üretiminde kullanılabilmektedir.

Literatürde endüstriyel atıkların seramik sektöründe kullanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bir çalışmada Seyitömer termik Santrali'nden temin ettikleri uçucu külü ağırlıkça %58'e kadar kil kuvars, atık mermer tozu ve atık cam tozlarını karıştırarak sağlık gereçlerinde kullanılan altlıklar için sır hazırlamışlardır. Sırda kullanılan uçucu kül miktarına bağlı olarak açık kahverenginden koyu kahverengiye doğru rengin değiştiğini tespit etmişlerdir (Yılmaz ve Toplan, 2004). Farklı bir çalışmada ferrokrom uçucu külü seramik karoların sırlarda renklendirici olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Endüstriyel pişirme işlemi sonrasında kullanılan sırın bileşenlerine bağlı olarak açık kahveden, koyu kahverengiye değişen renklerin oluştuğu farklı dokuların oluştuğunu tespit etmişlerdir (Bayer Öztürk ve ark,2015). Bir başka çalışmada demir çelik üretim atığı yüksek fırın cürufunun duvar karosu bünyesindeki kalsit ve kaolin ile yer değiştirmesi sonucu oluşan fiziksel, mikroyapısal özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu cürufun alternatif ikincil hammadde olarak belirli oranlarda kullanılabileceğini göstermişlerdir (Bayer Öztürk ve Eren Gültekin 2015). Boraks katı atığı ve uçucu külün duvar karosu özelliklerine etkileri bir araştırmaya konu olmuştur. Duvar karosu bileşiminde %2–5 aralığında boraks katı atığının %2–10 aralığında uçucu kül ile birlikte kullanımının duvar karosunun pişme mukavemetini arttırdığını görülmüştür (Olgun, vd., 2005). Taşçı, vd., 2018 tarafından yapılan bir çalışmada ise, endüstriyel duvar karosu sırlarının renklendirilmesi için Kayseri Çinkom Fabrikasından temin edilen çinko cevheri cürufu farklı oranlarda Fe_2O_3 ilavesi yapılarak kalsine edilmiş ve Fe_2O_3'in pigmentin renk gelişimine olan etkisi incelenmiştir. Uygulamada çinko cevheri cürufuna ağırlıkça % 5, 10, 15 oranlarında Fe_2O_3 eklenip 1150 °C'de kalsinasyona tabi tutulmuştur. Elde edilen pigmentler endüstriyel duvar karosu sırına ağırlıkça % 3, 6, 9 oranlarında ilave edilmiştir. Fe_2O_3 oranı arttıkça pigmentlerin rengi kahverengiden siyaha doğru değiştiği ve kristal faza kıyasla Fe_2O_3'in, camsı faz içinde çok daha yüksek oranda çözündüğü görülmüştür. Bir çalışmada seramik bünyeye cam atıkları ilave edilerek kullanım özellikleri incelenmiştir (Çavuş, 2002). Ayrıca kırmızı çamur atığından elde edilen bir pigmentin porselen karosuna ilave edilerek oluşan fiziksel ve mikroyapısal değişimler incelenmiştir (Karasu, vd.2004).

Bu çalışma kapsamında elde edilecek reçete optimizasyonu çalışmalarında uçucu kül atık olarak iki farklı duvar karosu mat sır reçetesi içerisine farklı oranlarda ilave edilerek elde edilen reçete kompozisyonlarının kimyasal dayanıma değişen oranlarındaki etkileri araştırılmıştır. Atık olarak ilave edilen hammaddelerin mat sır reçetesindeki kimyasal dayanımı üzerindeki etkisi optimum oranları ve süreç parametrelerinin belirlenmesi çalışmanın

amaçlarından biridir. Endüstriyel bünye ve sır reçeteleri ve pişirim ortamında yapılan sır denemelerinde mat sır sınıfında yer alan atık hammadde etkili sır reçetelerinin kimyasal dayanım etkileri incelenerek sonuçlar irdelenecektir. Çalışmada seramik sektöründe alternatif hammadde arayışları kapsamında bir endüstri atığı olan uçucu kül atığı seramik duvar karosu mat sırına renklendirici olarak ilave edilmiş ve etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda, atıkların kimyasal analizi yapılmış ve mineralojik özellikleri incelenmiştir. Kullanılan atıklar işletmede iki farklı duvar karosu mat sırının içerisine ağırlıkça % 0, 5, 10, 15 ve 20 oranında ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan sırlar ilk pişirimi yapılmış bünyeler üzerine slayt çekme metoduyla uygulanmış ve işletme fırınında 35 dakikada 1075°C'de pişirime tabi tutulmuştur. Sır içerisine ilave edildiği miktara bağlı olarak değişen renk tonları elde edilmiştir. Duvar karosu mat sırlarında L* a* b* cihazıyla renk analizleri yapılmış ve ayrıca sırlara laboratuvarda kimyasal dayanım testi yapılarak kimyasal dayanım özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca sırlara SEM ve EDX analizi yapılarak sır içerisindeki farklılıklara değinilmiştir.

2.MALZEME VE YÖNTEM

Uçucu kül, çeşitli endüstriyel işlemler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu küllerin özellikleri, enerji üretiminde kullanılan hammaddelerin içeriğine göre farklılaşmaktadır. Uçucu küller, enerji üretimi esnasında proseslerdeki yanma sonucu ortaya çıkan katı parçacıklarla birlikte yanma sırasında ortaya çıkan gazların karışımıdır. Uçucu küllerin kimyasal içeriği kullanılan kaynağa, yanma ve prosese göre değişmektedir. Uçucu küller, inşaatlarda kullanılan çimentoların bileşimleri içerisine katkı maddesi olarak katılmaktadır. Uçucu küller çimento üretimi için katkı maddesi olarak ilave edildiğinde, dayanıklılık artmakta ve üretilen betonun iyi işlenebilmesini sağlamaktadır. Uçucu küller ayrıca otoyolların inşaatında toprak stabilizasyonu için ve otoyol yataklarının güçlendirilebilmesi için kullanılmaktadır. Bu şekilde yolların daha dayanımlı ve daha uzun kullanımına katkıda bulunmaktadır (Görhan, G vd., 2008; Görhan, G vd., 2009).

Dünya'da yılda yaklaşık olarak 600 milyon ton kadar uçucu kül atık şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu atığın büyük bir kısmı kullanılamamakta çok az bir bölümü ise inşaat sektöründe kullanılarak tüketilmektedir. Ancak bu kullanım yeterli olmamakta ve dünya genelinde büyük uçucu kül dağları oluşmaktadır. Ülkemizde de kömür üretimi yapan termik santrallerde ortaya çıkan bu küller yeterince kullanım alanı bulamamaktadır. Ülkemizde 11 adet çalışan aktif termik santral yer almaktadır. Bu termik santrallerde üretim esnasında yıllık 15 milyon ton uçucu kül atık olarak oluşmaktadır. Kütahya ilinde aktif olarak çalışan en büyük termik santral Seyitömer termik santrali yer almaktadır. Kömürden enerji üretimi en yüksek olan bu santralde ortaya çıkan uçucu kül miktarı da oldukça fazladır (Türker vd., 2009).

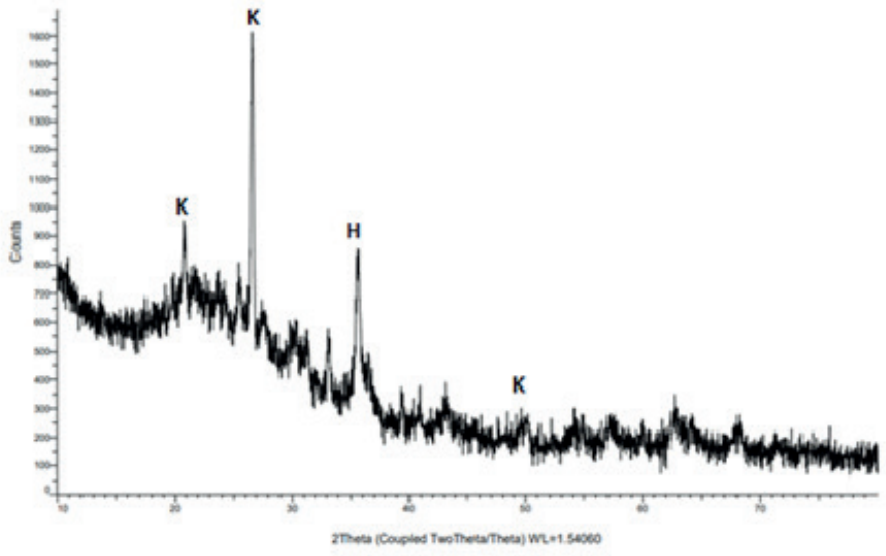
Çalışmamızda yer alan uçucu kül atıkları Seyitömer bölgesinde enerji üretimi için kullanılan kömürlerin atıklarıdır (Şekil 1). Hazırlanan sır reçete çalışmalarında kullanılan atıkların kimyasal ve mineralojik özellikleri incelenmiştir. Tablo 1'de yer alan kimyasal analizler sıra ilave edilen uçucu kül atıklarının içeriğini vermektedir. Uçucu küllerin kimyasal analizi için Spectro marka X-Lab 2000 model XRF cihazı kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan uçucu küle Rigaku -Miniflex XRD cihazıyla analizi yapılmış ve Şekil 2'te verilmiştir.



Şekil 1. *Seyitömer uçucu kül katı atığının görseli*

Tablo 1. *Seyitömer uçucu külün kimyasal analiz sonuçları.*

	Uçucu kül
MgO	5.87
Al_2O_3	16.87
SiO_2	44.65
P_2O_5	0.09
SO_3	1.46
MnO	0.13
K_2O	1.90
CaO	4.075
Fe_2O_3	11.45
TiO_2	0.722
ZrO_2	0.024
Cr_2O_3	0.096
Co_3O_4	0.093
BaO	0.04
ZnO	0.02
NiO	0.237
PbO	0.01
CuO	0.02
Loi	12.24
Toplam	99.99



Şekil 2. *Seyitömer Uçucu Kül XRD Analizi.*

Şekil 2'deki XRD analizine göre, uçucu kül katı atığında H: hematit ve K: kuvars pikleri yer almaktadır. Çalışmada kullanılan farklı iki mat duvar karosu sır reçetesinin segeri hesaplanmış ve bu standart sırlar içerisine %5 ila 20 arasında atık karışımı ilave edilmiştir. Seramik üretiminde farklı bileşimlerde sırlar üretilmektedir. Sırların bileşimlerini meydana getiren oksitler yüzdeleriyle değil, mol oranlarına göre hesaplanarak tanımlanmaktadırlar. Mol oranlarına göre yapılan bu tanımlama seger analizidir. Bu analizin hesabı sırda bulunan tüm toprak alkaliler, alkaliler, ve diğer bazik oksitlerin mol toplamları 1'e eşit olacak şekilde ayarlanır. Sırın segeri analizini yapabilmek için, sır içerisinde yer alan oksitlerin mol oranlarının bilinmesi gereklidir (Arcasoy, 1983). Çalışmada kullanılan farklı iki mat duvar karosunun segerleri Tablo 2 ve 3'te yer almaktadır. Çalışmada kullanılan duvar karosu Mat Sır-1 ve Mat Sır-2'nin arasındaki fark Mat Sır-1'in içerisinde opaklık özelliğinin bulunmasıdır. Bu sır yüzeye daha pürüzsüz ve satenimsi bir görüntü kazandırmaktadır. Kullanılan Mat Sır-1 ve Mat Sır-2'nin seger analizleri hesaplamaları yapılmış ve Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 2. *Kullanılan Mat Sır-1'in Seger Analizi*

Seger Analizi				
Bazik oksitler		**Amfoter oksitler**	**Asidik oksitler**	
0.05	ZnO			
0.02	MgO	0.076 Al_2O_3	1.22 SiO_2	Mat Sır-1
0.01	K_2O			
0.92	CaO			

Tablo 3. *Kullanılan Mat Sır-2'nin Seger Analizi*

Seger Analizi				
Bazik oksitler		**Amfoter oksitler**	**Asidik oksitler**	
0.086	Na_2O			
0.086	MgO	0.109 Al_2O_3	1.18 SiO_2	
0,05	ZrO_2			Mat Sır-2
0.03	K_2O			
0.714	CaO			

Bu sır reçetelerinin elek bakiye ve viskozite değerleri TSE EN ölçüm aralığı içerisinde hazırlanarak ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan atık ilaveli mat sırların uygulanması için ilk pişirimi 1150°C'de yapılmış duvar karosu bünyeleri kullanılmıştır. Karolara sırın uygulamasından önce viskozitesi 25 sn. ve litre ağırlığı 1810 gr/lt olan bir engop uygulaması yapılmıştır.

Daha sonra farklı iki mat duvar karosundaki etkilerini inceleyebilmek için ağırlıkça % 0, 5, 10, 15 ve 20 uçucu kül ilavesi yapılmış ve homojen olması için jet değirmende 10 dakikalık sürelerle karıştırılmıştır. Hazırlanan sırlarında viskozitesi 25 sn. ve litre ağırlığı 1830 gr/lt olarak ayarlanmış ve slayt çekim şeklinde uygulaması yapılarak işletme fırınında 1075°C'de 35 dakika pişirime tabi tutulmuştur.

Atıklar numunelerine X-ışını floresansı (XRF) (Spectro X-Lab 2000) ile kimyasal analizi yapılmıştır. Ayrıca hazırlanan atık ilaveli duvar karosu mat sır denemelerinin renk dağılımları PCE instruments colorimeter cihazında PCE-CSM2 model L*a*b* cihazında ölçülerek renk parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca hazırlanan duvar karolarının sır yüzeylerine NANO SEM 650 ile SEM ve EDX çalışması yapılmıştır.

Kimyasal maddelere dayanım testleri

Farklı sıcaklıklarda ergitilmesi ve soğutulması ile ortaya çıkan camsı bir tabaka olan seramik sırları, seramik bünyeyi ince bir film halinde kaplayarak onun üzerinde kimyasal bir bağ kurarak ergiyen bir yapı oluşturur. Oluşan bu ergiyik yapıda aranan en büyük özellik, üzerine çekildiği bünyeyle normal koşullarda fiziksel ve kimyasal bağlar kurmasıdır. Bu bağların çeşitli nedenler ile kuvvetli veya zayıf olması, sırın kalitesini de belirler. Hatasız bir sır tabakasının seramik altlık üzerinde genelde çatlamadan ve kavlamadan kalması beklenmektedir. Sır, seramik bünyeye çeşitli amaçlarla uygulanmaktadır; örneğin, seramik bünyeyi asidik ve alkali ortama dayanıklı kılmak, gözenekli yapıdaki seramik bünyeye düzgün bir yüzey kazandırmak, onu geçirimsiz kılmak ve bünyede mikroorganizma gelişimine engel olmak, bünyeye dayanım sağlamak ve dekoratif görüntü vermek gibi (Arcasoy,1983).

Çalışılan farklı sır reçetelerinde pişme sonrasındaki oksitlerin, renklendirici oksitlerin çözünme etkisini gözlemlemek amacıyla kimyasal dayanım testleri yapılmaktadır. Yapılan kimyasal dayanım testleri sır reçetelerini bazı sınıflandırmalara tabi tutar ve bu sınıflandırmalar sonucunda sırlı yüzeyler TSE 10545'e göre geçerli ya da geçersiz bir değer alarak gruplandırılabilir.

Çalışmada üretilen duvar karolarına bazı kimyasallarla oluşturulmuş sulu çözeltilerin etkisine maruz bırakılarak belirli bir süre sonunda oluşan hasarlar incelenmiştir. Uygulanan kimyasalların etkisi ayrı ayrı incelenerek bilgileri düzenlenmiştir. Çözelti uygulanan duvar karoları üzerinde analizler sınıflandırılmıştır.

Hazırlanan duvar karoları üzerinde sırasıyla laktik asit, sitrik asit, potasyum hidroksit ve hidroklorik asit kimyasalları uygulanmıştır.

1. % 5 (v/v) olacak şekilde Laktik asit çözeltisi hazırlanır.
2. 100 g/l olacak şekilde Sitrik asit çözeltisi hazırlanır.
3. 30 g/l olacak şekilde potasyum hidroksit çözeltisi, hazırlanmıştır.
4. Hidroklorik asit çözeltisi %3 (v/v), yoğunlaştırılmış hidroklorik asitten (1,19 g/ml) hazırlanmıştır.



Şekil 3. *Laboratuvarda Uygulanan Kimyasal Maddelere Dayanım Testleri*

Uygulanan deney çözeltilerinin uygulama aşamaları aşağıda verilmektedir. Çalışmada ilk önce, silindir parçanın kenarına yaklaşık 3 mm olacak şekilde sızdırmazlık malzemesi (gres yağı) bir tabaka şeklinde uygulanmaktadır. Silindirik parça, sırlanmış yüzeyin hazırlanmış kısmına baş aşağı çevrilecek şekilde konulmuş ve kenarı sızdırmazlık malzemesiyle kapatılmıştır. Hazırlanan çözelti 2 cm yüksekliğe kadar doldurulmuştur. Kimyasallara dayanımın saptanabilmesi için, çözeltiler numunelerin üzerinde 24 saat bırakılmıştır. Daha sonra silindir yüzeyden kaldırılmıştır ve uygulanan sızdırmazlık maddesi tamamen uzaklaşıncaya kadar, uygun çözücü ile duvar karosu sırlı yüzeyi temizlenmiştir. Potasyum hidroksit dayanımı için, duvar karosu deney çözeltisi ile 4 gün boyunca temas halinde bırakılmıştır. Uygulanan deneylerde günde bir defa olmak üzere deney düzeneği hafifçe sallanarak ve çözeltinin seviyesinin değişmemesi sağlanmıştır. İkinci günün sonunda deney çözeltisi değiştirilmiş ve iki gün daha geçtikten sonra silindir yüzeyden kaldırılmıştır ve uygulanan sızdırmazlık maddesi tamamen uzaklaşıncaya kadar, uygun çözücü ile duvar karosu sırlı yüzeyi temizlenmiştir. Atık ilaveli mat sırlı duvar karolarının kimyasal dayanım analiz sonuçlarına bakıldığında,

A sınıflandırması: gözle görünür herhangi etki yok,

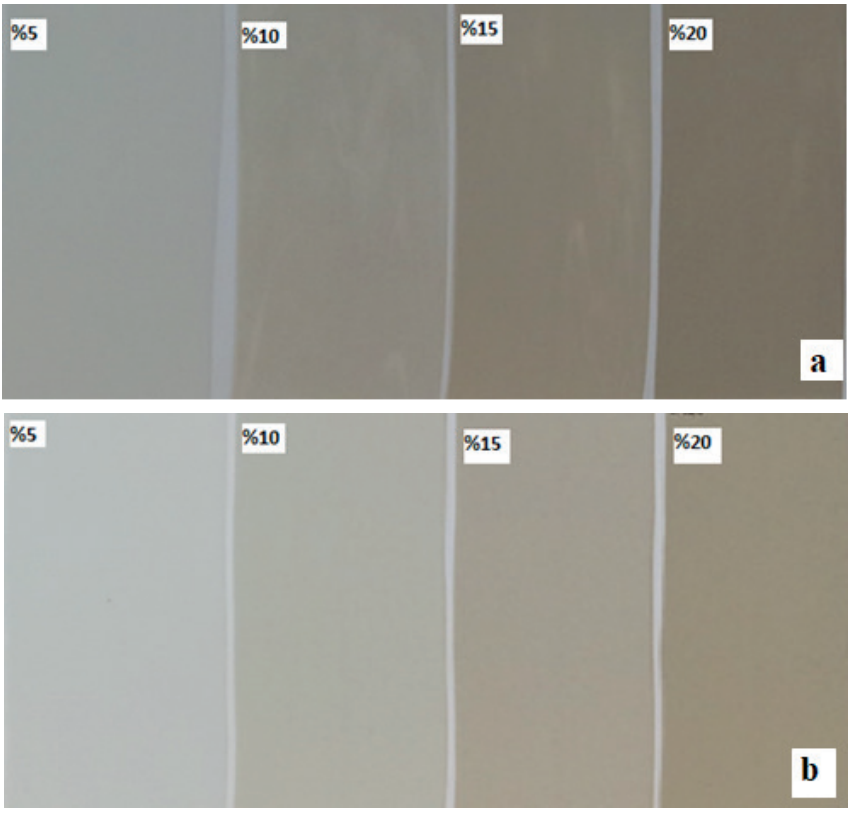
B sınıflandırması: gözle fark edilebilen değişim,

C sınıflandırması: başlangıç yüzeyinde tamamen veya kısmen değişim gibi etmenlere bakılarak sınıflandırma yapılmaktadır.

Bu sonuçlara göre üretimde kalite sınıflarına karar verilmektedir. Kalite sınıflandırılması bu şekilde A sınıflandırması 1., B sınıflandırması 2. ve C sınıflandırması 3. kalite şeklinde yapılmaktadır. Yüzeyde bir değişiklik ve herhangi bir deformasyon görülmemişse birinci kalite, yüzeyde bulanıklık ve değişim var ise ikinci kalite ve sırlı yüzeyde aşınma varsa üçüncü kalite olarak gruplandırılmaktadır.

DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI

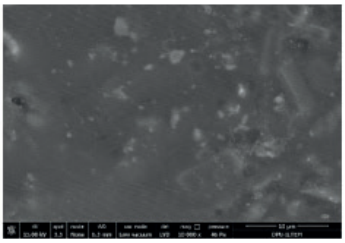
Çalışmada kullanılan uçucu külün iki farklı mat sır reçetesinden elde edilen görsel etkileri Şekil 4'te verilmiştir.

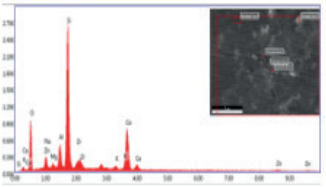


Şekil 4. a.*Uçucu Kül ilave edilmiş Mat Sır-1 kodlu duvar karosu mat sır numunelerinin görseli,* **b.***Uçucu Kül ilave edilmiş Mat Sır-2 kodlu duvar karosu mat sır numunelerinin görseli*

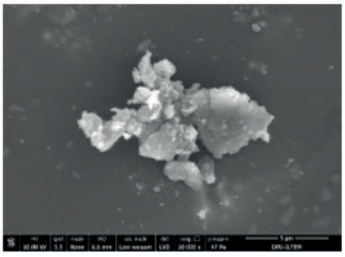
Tablo 4. *Uçucu Kül ilave edilmiş Mat Sır-1 ve Mat Sır-2 kodlu duvar karosu mat sır numunelerinin L*a*b* sonuçları*

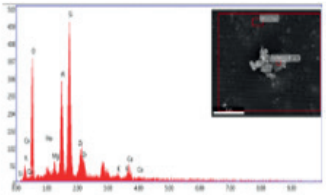
	Atık Oranı (%)	L*	a*	b*
Mat Sır-1	Std.	92,37	0,08	1,43
	5	87,79	1,18	9,62
	10	81,3	0,9	14,46
	15	75,84	0,19	17,97
	20	70,52	0,72	20,18
	Atık Oranı (%)	L*	a*	b*
Mat Sır-2	Std.	92,37	0,08	1,43
	5	87,57	1,09	9,92
	10	81,25	0,53	14,88
	15	76,05	0,45	18,62
	20	72,11	1,47	20,8





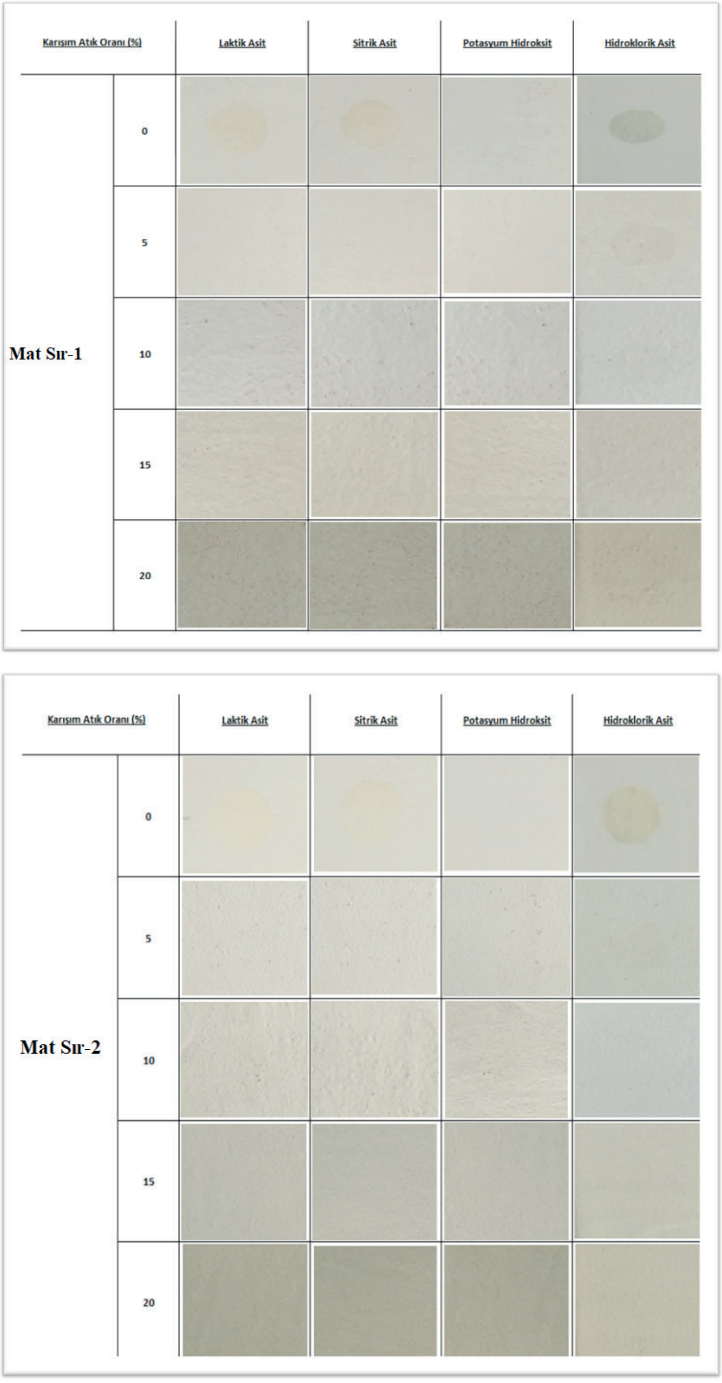
Element	Weight %
Zn O	2.39
Na_2O	0.17
MgO	0.77
Al_2O_3	6.05
SiO_2	48.40
ZrO_2	3.38
K_2O	1.74
Ca O	37.09





Element	Weight %
Na_2O	0.63
MgO	1.81
Al_2O_3	25.04
SiO_2	52.51
ZrO_2	5.54
K_2O	1.59
CaO	12.87

Şekil 5. *Uçucu Kül ilave edilmiş Mat Sır-1 ve Mat Sır-2 kodlu duvar karosu mat sırın farklı bölgelerinden alınan SEM –EDX analizleri*



Şekil 6. *Uçucu kül atığı ilave edilmiş Mat Sır-1 ve Mat Sır-2 kodlu duvar karosu mat sır numunelerinin kimyasal dayanım görselleri*

Tablo 5. *Uçucu kül atığı ilave edilmiş Mat Sır-1 ve Mat Sır-2 kodlu duvar karosu mat sır numunelerinin kimyasal dayanım sonuçları*

Seramik Karolar Kimyasal Dayanıklılık Tayini (TS EN ISO 10545-13)

	Atık Oranı (%)	Laktik Asit	Sitrik Asit	Potasyum Hidroksit	Hidroklorik Asit
Mat Sır-1	0	C	C	A	C
	5	A	A	A	B
	10	A	A	A	A
	15	A	A	A	A
	20	A	A	A	A

Seramik Karolar Kimyasal Dayanıklılık Tayini (TS EN ISO 10545-13)

	Atık Oranı (%)	Laktik Asit	Sitrik Asit	Potasyum Hidroksit	Hidroklorik Asit
Mat Sır-2	0	C	C	A	C
	5	A	A	A	B
	10	A	A	A	A
	15	A	A	A	A
	20	A	A	A	A

GENEL SONUÇLAR

Çalışmada kullanılan uçucu kül atıklarının tane boyutları küçüktür bu nedenle depolanması zordur. Atıkların doğa olayları yoluyla çevreye dağılması hava, toprak ve suların kirliliğini meydana getirmektedir. Bu çalışmada kullanılan katı atık malzemelerin kimyasal özellikleri incelendiğinde atık malzemelerde oransal olarak farklı oksitlerin varlığı görülmektedir. Atık hammaddelerin yapısı içerisinde bulunan geçiş elementlerinin seramik sektöründeki etkileri seramik prosesin farklı süreçlerinde farklı araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışmada ise endüstriyel mat sır reçetelerindeki renklenme etkisi, sır içerisinde kullanıldığındaki kimyasal dayanım etkileri 2 farklı mat sır reçetesi içerisinde ve farklı sektörlerin katı atıklarının herhangi bir ön işleme tabi tutulmaksızın sır reçetesi içerisine farklı oranlardaki ilavesi sonucundaki etkileri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirilmiş ve en iyi sonuç elde edilen katı atık ilaveli reçetelerin %5 katı atığı içeriğine sahip sırlar olduğu görülmüştür ve bu sırlara analizler uygulanmıştır. Ayrıca sırların karakterizasyonları yapılarak kimyasal dayanım sonuçları ile sonuçlar incelenmiştir.

Uçucu kül katı atığının iki farklı standart mat sır reçetesine ilave edilerek endüstriyel hızlı pişirim yapılması ile elde edilen L*a*b* renk değişimleri incelendiğinde; reçete içerisindeki artan oranları iki farklı mat sır için benzer şekilde L*'de düşüş, a* ve b* değerinde artış göstermiştir.

Tüm katkı oranlarında düzgün sırlı yüzeyler elde edilmiştir. Elde edilen en iyi yüzey olan %5 katkılı sır reçetelerinin SEM analizleri de incelendiğinde atık hammaddenin sır içerisinde homojen dağıldığını, renk etkinliğinin vererek hammaddenin varlığı sır reçetelerinde belirlenmiştir.

Atık malzemenin sır içinde kullanım miktarı arttıkça sır içindeki kristallenme miktarı artmıştır. Sır içerisinde tabaka halinde oluşan kristal fazın dendritik bir yapıya sahip olduğu söylenebilir ve SEM'in büyütmesinin arttırılmasıyla dendritik kristal yapının daha net görülebildiği söylenebilir.

%5 atık katkılı sırlarda yapılan EDX analizlerinde kristal yapıların ağırlıklı bir şekilde Al, Si, Na, Ca, ve K elementlerini içerdiği görülmüştür. Ayrıca farklı duvar karosu mat sır reçeteleri içerisindeki aynı atık oranı SEM fotoları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde kullanılan atıkta Fe elementi içeriği oldukça yüksek olmasına rağmen Fe elementinin ortaya çıkmadığı görülmüştür. Bu durum Fe elementinin duvar karosu mat sırı içerisinde çözündüğü ve yapı içerisinde hapsolduğunu söylenebilir.

KAYNAKÇA

Arcasoy, A. (1983). Seramik Teknolojisi. Marmara Üniversitesi Yayın No:457, Güzel Sanatlar Fakültesi Yayın No:2, Eskişehir.

Bauerle, J.E., 1969, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 30, p. 2657.

Bayer Ozturk Z., Atay B., Çakı M., Ay N. "An investigation of color development by means of the factorial design in wall tile glazes with ferrochromium fly ash", Indian Journal of Engineering & Materials Sciences Vol. 22, 215-224, April 2015.

Bayer Ozturk Z., Eren Gültekin E., "Preparation of ceramic wall tiling derived from blast furnace slag", Ceramics International, 41, 12021-26, 2015.

Çavuş, G. (2002). *Geleneksel seramik üretiminde pencere camı atıklarının değerlendirilmesi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Görhan, G. , Kahraman, E. , Başpınar, M. S. & Demir, İ. (2008). Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları . Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi , 4 (2) , 85-94

Görhan, G. , Kahraman, E. , Başpınar, M. S. & Demir, İ. (2009). Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler . Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi , 5 (2) , 33-42 .

Karasu, B.,Çakı, M., Akgun, E., Kaya, G., (2004). Effects of the Red Mud Based Pigment Addition on the Physical and MicroStructural Properties of Porcelain Tiles. Key Engineering Materials - *Key Eng Mat.* (Vols. 264-268). 1613-1616.

Olgun, A., Erdoğan, Y., Ayhan, Y., Zeybek, B., "Development of Ceramic Tiles From Coal Fly Ash and Tincal Ore Waste". Ceramics International, 31, s.153—158, 2005.

Taçyıldız, E. (2018). Seramik sırrının sırrı (1. Basım). İstanbul: Hayalperest Yayınevi.

Yılmaz, Ş., Toplan, H., (2004). "Uçucu Kül Esaslı Sırlar ve Endüstriyel Uygulamaları". Seramik Türkiye Dergisi, Temmuz-Eylül, s.151–154.