

MÜHENDİSLİK

ALANINDA ULUSLARARASI ARAŞTIRMALAR - II

Aralık 2022

EDİTÖRLER

PROF. DR. COŞKUN ÖZALP
DOÇ. DR. ERTAÇ HÜRDOĞAN

 **D 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 2022

ISBN • 978-625-6399-09-9

© 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: Yalı Mahallesi İstikbal Caddesi No:6

Güzelbahçe / İZMİR

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruyenyayinevi.com

e-mail: seruyenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırmalar - II

Aralık 2022

Editörler

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP
Doç. Dr. Ertaç HÜRDOĞAN

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ ISI POMPASI
SİSTEMLERİNDEKİ GÜNCEL GELİŞMELER

Yağmur ATALAYIN, Can COŞKUN, Zuhal OKTAY 1

BÖLÜM 2

AHŞABIN ÖZELLİKLERİ İLE GELENEKSEL AHŞAP YAPI
SİSTEMLERİ VE RESTORASYONLARININ İNCELENMESİ

Varol KOÇ 13

BÖLÜM 3

GRANİT PLAKALARININ EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI İLE
SINIFLANDIRILMASI*

M. Fatih ZİYALİ, Nesibe YALÇIN, Sibel ÜNALDI.....31

BÖLÜM 4

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE AERODİNAMİK ANALİZLERİ

V. Tuna ŞABA, Can COSKUN, Zuhal OKTAY43

BÖLÜM 5

BÖBREK HÜCRELİ KARSİNOMUN DERİN ÖĞRENME İLE
SINIFLANDIRILMASI

Cihan AKYEL.....61

BÖLÜM 6

DERİN ÖTEKTİK ÇÖZÜCÜLER: GENEL ÖZELLİKLERİ VE
GIDA SANAYİNDE KULLANIM OLANAKLARI

Çağlar Mert AYDIN, Alper GUVEN69

BÖLÜM 7

GEOGRİDLERİN KARAYOLU TABAN ZEMİNLERİNİN CBR
DEĞERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Erdiñç KESKİN, İlker ŞAHİNOĞLU91

BÖLÜM 8

MİKROALGAL BİYİYAKIT ÜRETİMİNDE OMİKS
YAKLAŞIMLARI

Esmā ÖZHÜNER, Mehmet Ali BİBERCİ..... 109

BÖLÜM 9

NİKEL CEVHER ATIKLARININ KURŞUNLU ÇİNİ SIRLARINDA DEĞERLENDİRMESİ

Hale YILDIZAY..... 121

BÖLÜM 10

ÜRETİMDE BASKIN BİR PARAMETRE HALİNE GELEN İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ (İSG) DİSİPLİNİ VE YENİ YAKLAŞIMLAR

Metin Uçurum..... 139

BÖLÜM 11

MODERN DERİN ÖĞRENME TABANLI NESNE ALGILAMA MODELLERİNİN İNCELENMESİ

Ömer KAYA, Muhammed Yasin ÇODUR 155

BÖLÜM 12

MEYVE VE SEBZELERİN DONDURULARAK KURUTULMASI

Ramazan Ülkü ÇETİN..... 177

BÖLÜM 13

BİYOJEN AMİNLER

Şehriban Oğuz, Seval Andiç 195

“

BÖLÜM 1

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ ISI POMPASI SİSTEMLERİNDEKİ GÜNCEL GELİŞMELER

Yağmur ATALAYIN¹

Can COŞKUN²

Zuhal OKTAY³

”

1 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, 2217104010@std.idu.edu.tr,
<https://orcid.org/0000-0002-6966-7853>

2 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, dr.can.coskun@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-4100-0296>

3 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, zuhal.oktay@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0001-6167-7048>

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması ve sanayileşme nedeniyle enerjiye olan talep de artmaktadır. Yüzyıllardır bu talebin karşılanmasındaki büyük sorumluluk fosil yakıtlara aittir. Lakin fosil yakıtların büyük bir artışla yok olmaya devam etmesi ve çevre üzerindeki negatif etkileri nedeniyle insanlar çeşitli enerji kaynakları arayışına girmektedir. Çalışmalara baktığımızda rüzgar, güneş, hidrolik vb. gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili çok sayıda çalışma alternatif enerji kaynaklarına doğru bir eğilim göstermektedir. Dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olduğu gerçeğiyle karşı karşıya kalan ülkeler, enerji dengelerini gözden geçiriyorlar. Devletin ve hatırı sayılır firmaların son zamanlardaki enerji ve üretim yöntemlerine bakıldığında şu görüşlerin benimsendiği görülmektedir: Enerjinin güvenliği, iktisadi kalkınma, çevreyi koruma (Kandirmış, 2017).

Küresel enerji talebi son yüzyılda önemli ölçüde arttı, ancak belirleyici enerji arzı petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlar olmaya devam ediyor. Fosil yakıtların tüketimini azımsamak için çeşitli enerji kaynaklarına yönelim artmış ve bununla birlikte güneş enerjisi mühim bir enerji kaynağı haline gelmiştir (Riffat ve Buker, 2016; Yalun ve ark., 2020). Avrupa’da üretilen ısının çoğu fosil yakıtlardan geliyor ve bu da sera gazlarında artışa neden oluyor. (Poppi ve ark, 2018). Yenilenemeyen karbon kaynaklarının tüketimini hafifletmek ya da bitirmek için Carnot döngüsünün tersini kullanan makinelere ısı pompası denir. Kullanım suyu ve alan ısıtma için ısı kolektörleri ve ısı pompası sistemlerinin bir kombinasyonu kullanılır. Isı pompasına olan rağbet son zamanlarda oldukça çoğalmıştır (Fan ve ark, 2021).

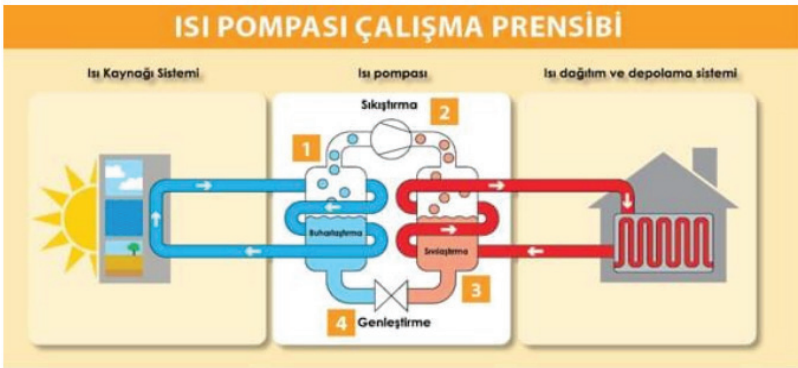
Güneş enerjisi, ülkemiz için önemli bir potansiyele sahiptir. Ulusal Hava Durumu Servisi’ne göre, çoğu Avrupa ülkesi yaklaşık 1600 saat güneş ışığına sahipken, Türkiye yaklaşık 2640 saat güneş ışığına sahiptir (Şensoy, 2019). Diğer yenilenebilir enerji çeşitlerine göre güneş enerjisi daha avantajlıdır. Güneş enerjisi verimli, saf ve lokal uygulamalara uygundur. Bu yenilenebilir enerjinin gereksinim duyulan her lokasyondan temin edilebilmesi mühim bir avantajdır. Ülkemiz güneş enerjisi bakımından önemli bir alanda bulunmasına karşın, enerjiden yeterli seviyede yararlanamamaktadır. Total ışıma değeri 1.311 kWh/m²-yıl olarak verilmiştir (Varınca ve Gönüllü, 2006). Verilen değer, senelik 380 milyar kWh enerji potansiyelini temsil etmektedir. Bu enerji kullanımı, enerji tasarrufuna mühim derecede katkı sağlayacak ve çevreye faydalı olacaktır. Güneş enerjisinden yararlanmak için farklı araştırmalara devam edilmektedir. Güneş enerjili ısı pompalarının kullanımı ile enerji tasarrufuna önemli katkılar sağlanabilir.

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ve nüfus artışı enerji talebinin de artmasına neden olmaktadır. Evler ve ticari binalar, küresel elektriğin %40'ını oluşturmaktadır. Elektriğin çoğu ısıtma, havalandırma ve soğutma ihtiyacı sebebiyle kullanılmaktadır (Pérez-Lombard ve ark., 2008).

2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE ISI POMPALARI

Isı transferi, sıcaklık farkı olan herhangi bir ortamda gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklı mahalden düşük sıcaklıktaki mahale ısı transferi gerçekleşir. Herhangi bir şey kullanılmaz doğal olarak oluşur. Isı pompası ve soğutma makinesi adı verilen cihaz vasıtasıyla bu olayın tersi yapılarak ısı soğuk ortamdan sıcak ortama aktarılır. Soğutma makinesi ve ısı pompası benzer çevrimde çalışır. Kullanım maksadı soğutma makinesi ve ısı pompası arasındaki tek farktır (Çengel ve Boles, 2008). Isı pompası kaynakları su, toprak ve havadır. Hem ısıtma hem soğutma için ısı pompası kullanılabilir.

Freon gazı ısı pompası akışkanı olarak kullanılabilir. Bu gazların düşük sıcaklıklardaki buharlaşma özellikleri ısı pompalarında ve soğutma makinelerinde kullanılmaktadır. Şekil 1, tipik bir ısı pompası cihazının çalışma prensibini göstermektedir. Evaporatörde kaynaktan gelen akışkan ile ısı transferi gerçekleşir. Akışkanın sıcaklığı evaporatörde uzaklaştırılır ardından gaza bırakılır. Isıyı alan akışkan buharlaşmaya başlar ve buharlaşan akışkan kompresör tarafından sıkıştırılarak sıcaklığı ve basıncı artır. Isıtılan gaz, kondenserde çevreye ısı verir, gaz sıvı hale dönüşür ve valfe gider. Valfte ısı atan akışkanın basıncı azaltılır ardından evaporatöre geri döner. Bu şekilde bir döngü işlevi gerçekleştirilir (Patlar, 2006). Çevrim Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1 Isı pompası ekipmanlarının çevrimi

Isınma ihtiyacı için ısı pompası, enerji açısından ve maddi açıdan büyük fayda sağlar. Bunun gibi bir ısıtmanın mühim avantajı, ısıtma için ısı pompasını çalıştırmak için gereken işten daha fazla enerjinin mevcut

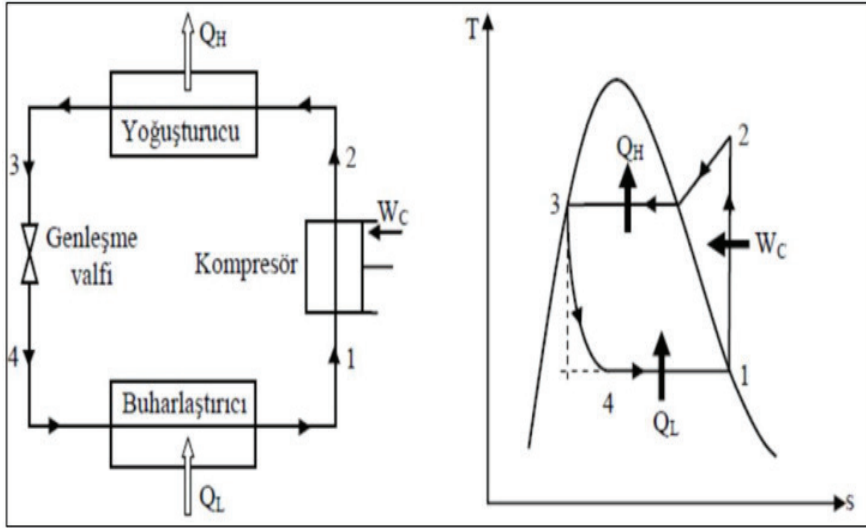
olmasıdır. Esasında gelişmiş ısı pompaları, 3.5 ila 5.5 arasında bir verim katsayısına (COP) ulaşabilir. Sonuç olarak, 1 kWh enerji harcaması ile 3,5 ila 5,5 kWh ısıtma enerjisi üretmeyi mümkün kılar. Bu performans avantajı, hem ısıyı hem de soğuğu daha az kirlilikle üretebilmeleri ve endüstriyel uygulamalarda uygulanabilirliği ile birlikte bu makinelerin popülaritesini çoğaltmıştır (Mumovic ve Santamouris, 2009).

2.1 ISI POMPASI BİLEŞENLERİ VE BAZI İFADELER

Bir ısı pompası, Şekil 2’de gösterilen ideal buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi prensibine göre çalışır. Bu ideal döngü dört süreçten oluşur (Çengel ve ark, 2006).

- 1-2: Kompresör yardımı ile sabit entropide sıkıştırma
- 2-3: Kondenserden ortama sabit basınçta ısı transferi
- 3-4: Valfte genleşme ve basınç düşüşü
- 4-1: Evaporatörden akışkana değişmeyen basınçta ısı transferi

Şekil 2’de İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi verilmiştir (Gü-leryüz,2019).



Şekil 2 İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi

Isı pompasında, soğutucu akışkan evaporatörde soğuk ortamdaki ısıyı çekerek buharlaşır ve kompresörde sıkıştırılarak kızgın buhar olarak kondensere giriş yapar. Soğutucu akışkan yoğuşturucuda ısısını çevre ortama atarak yoğuşur ve sıvı hale dönüşür. Ardından genleşme valfinde gaz

hacmi artırılarak basıncı azalan soğutucu akışkan evaporatöre gider ve çevrimi tamamlar.

Buharlaştırıcı (Evaporatör): Soğutucu akışkanın mahalden ısıyı çektiği ve düşük sıcaklıkta buhar haline dönüştüğü bir ısı değiştiricisidir. Buhar haline dönüşen soğutucu akışkan kompresöre iletilir.

Kompresör: Buhar şeklinde alınan soğutucu akışkanı sıkıştırır ve soğutucu akışkan kompresör çıkışında aşırı ısınmış kızgın buhar haline gelir.

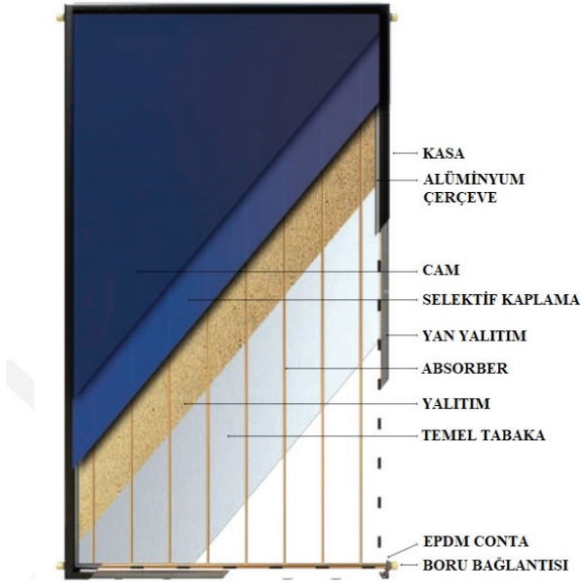
Yoğusturucu (Kondenser): Soğutucu akışkanın ortama ısı vererek yoğuştuğu (sıvılaştığı) bir ısı eşanjörüdür.

Genleşme valfi: Yoğuşan soğutucu akışkanın basıncının azaltıldığı elemandır. Düşük basınçta sıvı-buhar karışımı olarak evaporatöre iletilir.

Performans katsayısı: Bir ısı pompasının verimliliğini anlatan değerdir. Belirli bir sıcaklıkta ısı pompasının enerji çıkışının ısı pompası tarafından tüketilen enerjiye bölünmesiyle hesap edilir. Isı pompasının COP değeri fazla olursa daha verimli hale gelir. Bu veri, içeriğinin ve dışarının sıcaklığıyla alakalıdır (Çengel ve ark, 2006).

2.3 PLAKA-DÜZ TERMAL KOLEKTÖRLER

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinin çalışmalarında fazlaca rağbet gören kolektör plaka kolektördür.



Şekil 3 Plaka termal güneş kolektörü

Özgün kolektör Şekil 3’te gösterilmiştir. Güneş radyasyonu şeffaf camdan geçer, seçici bir yüksek absorpsiyon kaplaması tarafından emilir ve yüzeye bağlı ince tüplere iletilir. Bu tüplerdeki akışkan tarafından emilen termal enerji, toplama ya da tüketim için akışkan vasıtasıyla gezdirilir. Kolektörün aşağısı ve yanları ısı kaybını azaltmak için yalıtılmıştır. İnce boru, akışı tamamlamak için daha büyük çaplı boruları birleştirir (Kalogirou, 2004).

Performans değerini en çok arttıran güneş kolektörü yüzeyine yapılan çekici kaplamadır. Çekici kaplamaların en mühim görevi güneş ışığını en fazla şekilde çekmesi ve ısıya çevirmesidir. Çekici yüzey kaplamalarından birisi kara ve parlak olmayan boyadır. Kara ve parlak olmayan boyanın güneş ışığını çekme oranı (%90-98) daha çoktur (Tırış ve Varol, 1994). Dolayısıyla, emici bir kaplama olarak siyah mat bir renk kullanılır. Kolektörler, alanın enlemine göre belirli bir açıyla güneşten maksimum düzeyde faydalanacak şekilde yerleştirilir.

3.YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tayvan iklim koşullarında güneş enerjili direkt genleşmeli ısı pompası sisteminden sıcak su elde etmek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Test sonuçlarının, deneyden önce yapılan simülasyon sonuçlarıyla tutarlı olduğu bulundu. Bir yıldan fazla süren denemelerde, donanımın COP değeri 1,7 ile 2,5 aralığında değişmiştir. COP seviyelerinin yıl boyunca 2,0 civarında dalgalandığı ve sistemin yıl boyunca her gün 4-8 saat aralığında çalıştığı gözlemlendi.

Ayrıca çalışma sonucunda, sistem kapasitesi dikkate alınarak sıcak su depolama tankının kapasitesi artırılarak daha iyi sistem performansı elde edilebileceği önerilmiştir (Chyng ve ark., 2003).

İstanbul şehrinin iklim koşullarında yedi ay boyunca kışın su ısıtması için tasarlanmış güneş enerjisi destekli bir ısı pompası düzeneğinin kuramsal analizi yapılmıştır. Gözlemciler kuramsal analizler yardımıyla yazılımlar geliştirmişlerdir. Yazılım, ortalama 24 saatlik kolektör verimi, güneş ışığı, yoğunlaştırıcı 30 günlük yaklaşık enerji geçişi, 30 günlük düşük sıcaklık kapasitesi ve performans değeri gibi parametreleri araştırmak için kullanıldı. Çalışmalar, azalan güneş ışığının ve güneş sıcaklığının yoğunlaştırıcıların verimliliğini azalttığını ve bunun da düşük sistem performansına neden olduğunu vurgulamıştır. Deneysel çalışmalar, ısı pompalarının COP değerlerinin iklim koşullarına bağlı olarak 4.0 ile 5.2 arasında değiştiğini bulmuştur (Yamankaradeniz ve Horuz ,1998).

Isıtma, soğutma ve sıcak su temini gibi faaliyetleri gerçekleştirebilen en direkt güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri üzerinde çalışılmıştır. Araştırmada bu sistem için dinamik bir mekan ısıtma ve su

ısıtma modeli geliştirilmiş ve modelin sonuçları deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Kurulan sistem, çeşitli iklim koşulları altında test edilmiş ve veriler, %5'ten çok daha düşük sapmalarla simülasyonlar ile uyumlu olmuştur. Güneşlenme 0 W/m^2 'den 800 W/m^2 'ye çıkarken, ısıtma için donanımın verim katsayısı 2,35'ten 2,57'ye yükseldi. Su sıcaklığının artırılmasına bağlı deneylerde ise, su derecesinin 200 'den 350 'ye çıkmasıyla birlikte enerji sarfiyatının %16,52 yükselmesine karşılık COP verisinin %15,86 yükseldiği anlaşılmıştır (Cai ve ark., 2016).

Bu çalışmada, güneş enerjisi destekli hava kaynaklı ısı pompasına sahip iki katlı bir binada yerden ısıtma analiz edilmiştir. Ankara gibi kışın sert geçtiği mahalde kaynağı hava olan ısı pompalarının ve güneş enerjisinin performansı incelendi. Yapının ısı kaybı 19,2 kW değerinde hesap edilmiş, 18,5 kW ısı pompası tercih edilmiş ve $13,92 \text{ m}^2$ kolektör kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda sistemin doğal gaz sistemlerine göre yılda 580.2 m^3 tasarruf edebileceği hesaplanmıştır (Ceylan, 2010).

Şangay hava şartlarında (GEL)'i ısıtmak için desteği güneş enerjisi ve kaynağı toprak olan ısı pompası sisteminin araştırmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde tüm ısıtma yükünün güneş kolektörleri vasıtasıyla %37 oranında karşılanabildiği tespit edilmiştir. Güneş kolektörlerinin donanımında bulunmasının tüm enerjisi sarfiyatını %26,1 kadar hafifleteceği belirlenmiştir. Donanımın performans katsayısı verisi 4,5 olarak bulunmuştur (Andersen ve Li ,2015).

R-407C soğutucu akışkan bulunan bir doğrudan genleşmeli güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemi ile alan ısıtmanın çalışması sunuldu. Sistemin buharlaştırıcısı camsız güneş kolektörüdür. Mahal sıcaklığı, güneş ışıınım ölçüsü ve kolektör yüzeyinin ısı pompası performans katsayısı değeri, kompresör hızı ve ısıtma kapasitesi üzerindeki etkileri üzerine çalışılmıştır. Çalışmada ısı pompası sisteminin performans katsayısı verisinin 2,2 ile 4,3 değerleri aralığında dalgalandığı tespit edilmiştir. Araştırma neticesinde, mahal sıcaklığı ve güneş ışığı verisinin artmasından ötürü olarak ısı pompasının performans katsayısı verisinin mühim değerde yükseldiği lakin kolektör bölgesinin performans katsayısı verisini değiştirmedeği anlaşılmıştır (Molinari ve ark., 2014) .

Araştırmalarında güneş enerjisi destekli ısı pompası düzeneği üzerine çalışılmıştır. Güneş enerjisi destekli buhar sıkıştırırmalı ısı pompası 1.5 metre boyunda kılcal boru, 1,4 kW değerinde kompresör ve 8,2 kW değerinde buharlaştırıcıdan meydana gelmiştir. Soğutma için performans katsayısı ısı pompası verilerinden %5-20 kadar daha az hesap edilmiştir. Isı pompası için performans katsayısı 2-3,125 değerleri aralığındadır. Ayrıca soğutucu akışkan olarak R-22 sisteme dahil edilmiştir. (Özgener ve Hepbaşlı, 2007).

Mekanizmaya R-134a soğutucu akışkan olarak dahil edilmiştir. Çalışmalarında bir kurumun gereksinimi olan her gün kullandıkları 5 tonluk suyun 14°C'den 50°C'ye artırılması için ısı pompası mekanizmasının gereksinim duyduğu ısı yükünün kolektörden karşılanan kısmının miktarını ve karşılanamayan kısmının miktarı araştırılmış performans katsayısı 4,39 olarak hesap edilmiştir. Isı yükü için ısı pompası elemanları ve kolektör alanı da çalışmaya dahil edilerek kompresör verisi 7,7 kW, evaporatörün alacağı ısı yükünü 28,31 kW ve soğutucu akışkanın herhangi bir kesitinden birim zamanda geçen akışkan hacmi 0.23 kg/sn olarak bulunmuştur (Yamaç, 2005).

Güneş enerjisi destekli ısı pompası düzeneği üzerinde araştırma yapılmıştır. Araştırmada meteorolojik bilgi olarak Singapur'un değerleri kullanılmıştır. Bu araştırmada üstü kapalı olmayan levha şeklinde güneş kolektörü ve soğutucu akışkan olarak R-134a tercih edilmiştir. Performans katsayısı 9 ve %75 değerinde kolektör verimi hesap edilmiştir. Bazı finansal hesaplamalar ile mekanizmanın aşağı yukarı iki senelik geri ödeme vaktine gereksinim duyduğu hesap edilmiştir (Hawlder ve ark., 2000).

Güneş enerjisi destekli düz kolektörlü normal düzeyde ve maliyetli ısı pompası üzerine araştırma yapılmıştır. Kaynağı su olan ısı pompası ve bir de sıcak su depo etme tankı modellenerek, bütün mekanizmanın ve bu mekanizmanın parçalarının ısı performansını, 2000-2001 yılları arasında Çin'in kuzeyinde çalışmalar yaparak araştırılmıştır. Mekanizmada 2.2 kW değerinde ısı pompası, 11 m² boyutunda kolektör ve 2,1 m³'lük su depo etme tankı kullanılmıştır. Performans katsayısı 2,55 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla bu tarz bir ısı pompası gereksinimi duyanlar için mekanizmanın gelişim süreci ve tasarımı yardımcı olacak mühim detaylar geliştirilmiştir (Kuang ve ark., 2003).

Isıl enerji üniteli mahal sıcaklığını artırmak için kullanılan güneş enerjisi destekli ısı pompası tasarımı için yapılan araştırmada kaynağı güneş olan ısıtıcıların ısı pompalarındaki buhar sıkıştırma faaliyeti ve çeşitli hedeflere yönelik termal enerji elde ettiğini ve termal enerji biriminin güneş enerjisi tercih edildiğinde çok fazla fayda sağladığı belirtilmiştir (Badescu, 2001).

Ankara ilinde güneş enerjisi destekli ısı pompasının 2006 senesinin Mart ayı süresince 11.00 ile 14.00 saatleri arasında yetkinliği araştırılmıştır. Isı pompasının evaporatörü olarak kolektör tercih edilmiştir. R404A soğutucu akışkan olarak seçilmiştir. Bu işlemler sonucunda güneş enerjisi destekli ısı pompası yardımıyla yüksek sıcaklıklı su üretiminde ITK değeri 3,79 olarak bulunmuş ve kolektör yardımıyla dışarıdan çekilen ısı tutarı fazlalaştıkça mekanizmanın ITK değerinin arttığı izlenmiştir (Kılıç, 2006).

Oluşturulan mahalde çeşitli sıcaklık ve havanın nemi için kaynağı hava olan ısı pompası su ısıtıcısı araştırılmıştır. Bütün mekanizma veriminin çevre koşulları ile alakalı olduğu ve kompresörde en fazla, kısılma vanasında en az tersinmezliğin olduğu belirlenmiştir (Öztürk ve Erbay, 2012).

Candan ve arkadaşları (Candan ve ark., 2021) tarımsal uygulamalar için fotovoltaiik destekli ısı pompalı kurutucunun tasarımı ve deneysel analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın en önemli kısmı verileri anlık olarak kaydederek analizleri bu veriler üzerinden gerçekleştirmişlerdir. Güneş enerjisi destekli ısı pompası uygulamalarında anlık yapılan literatürdeki ilk çalışma olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.SONUÇLAR

Güneş enerjisi destekli ısı pompaları için yapılan çalışmalar ışığında, azalan güneş ışığının ve güneş sıcaklığının yoğunlaştırıcıların verimliliğini azalttığını ve bunun da düşük sistem performansına neden olduğunu vurgulamıştır.

Güneşlenme miktarı arttığında ısıtma için sistem performans katsayısı da artmaktadır. Sistemden su ısıtılmasına ilişkin deneylerde ise, su sıcaklığının fazlalaşması ile beraber enerji sarfiyatının gittikçe yükselmesine karşılık COP parametresinin de belli oranlarda yükseldiği tespit edilmiştir.

Yerden ısıtma analizlerinde ise binaların ısı kaybı hesap edilmiş ve bununla birlikte ısı pompası ve kolektör seçimi yapılmıştır. Bunun sonucunda sistemin doğal gaz sistemlerine göre yılda 580.2 m³ tasarruf edebileceği hesaplanmıştır. Güneş enerjisi destekli ısı pompalarının tasarruf miktarı bu sayede göz önüne serilmiştir.

Tüm ısıtma yükünün güneş kolektörleri vasıtasıyla %37 oranında karşılanabildiği tespit edilmiştir. Güneş kolektörlerinin bulunmasının tüm enerjisi sarfiyatını %26,1 kadar hafifleteceği belirlenmiştir.

Mahal sıcaklığı, güneş ışınım ölçüsü ve kolektör yüzeyinin ısı pompası performans katsayısı değeri, kompresör hızı ve ısıtma kapasitesi üzerindeki etkileri üzerine çalışıldığında ise, mahal sıcaklığı ve güneş ışığı miktarının yükselmesiyle bağlantılı olarak ısı pompasının performans katsayısı verisinin mühim değerde yükseldiği lakin kolektör bölgesinin performans katsayısı verisini değıştirmedeği anlaşılmıştır.

REFERENCES

- Anonim 1, *Isı pompası genel çalışma prensibi ile ilgili gösterim*. <https://www.tesisat.org/isi-pompasi-nedir-isi-pompasi-nasil-calisir.html>. (Ziyaret tarihi: Kasım 2022).
- Andresen, H.T., ve Li, Y. (2015). *Modelling the heating of the green energy lab in shanghai by the geothermal heat pump combined with the solar thermal energy and ground energy storage*. Energy Procedia, 70, 155-162
- Badescu, V., 2002, *Model of solar-assisted heat-pump system for space heating integrating a thermal energy storage unit*, Energy and buildings, 34, 715-726
- Buker, M.S., Riffat, S.B., 2016. *Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review*. Renew. Sustain. Energy Rev. 55, 399–413. doi:10.1016/j.rser.2015.10.157
- Candan, D., Oktay, Z., Coskun, C. (2021) *Design and an instantaneous experimental analysis of photovoltaic-assisted heat pump dryer for agricultural applications using banana chips*. Journal of Food Process Engineering, 44(10), e13832. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13832>
- Cai, J., Ji, J., Wang, Y., ve Yu, B. (2016). *A novel PV/T-air dual source heat pump water heater system: Dynamic simulation and performance characterization*. Energy Conversion and Management, 148, 635-645.
- Ceylan, T. (2010) *İki Katlı Bir Binanın Güneş Enerjisi Destekli Hava Kaynaklı Isı Pompasıyla Isıtılması ve Sıcak Su Eldesinin Analizi*, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi, Ankara, 116s.
- Chyng, J.P., Lee, C.P., ve Huang, B.J. (2003). *Performance analysis of a solar-assisted heat pump water heater*. Solar Energy, 74, 33-44.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A. (2006). *Thermodynamics: An Engineering Approach 5th Edition*. McGraw-Hill, 607-631.
- Çengel Y., Boles M.A., 2008. *Thermodynamic An Engineering Approach*, 5th ed. Mc Graw Hill, Boston, England.
- Fan, Y., Zhao, X., Han, Z., Li, J., Badiei, A., Akhlaghi, Y.G., Liu, Z., 2021. *Scientific and technological progress and future perspectives of the solar assisted heat pump (SAHP) system*. Energy 229 2021 , 120719. doi:10.1016/j.energy.2021.120719
- Güteryüz, B. (2019). *Güneş enerjisi destekli ısı pompası sisteminin termodinamik analizi*. Yüksek lisans tezi, Kütahya Dumlupınar üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Hawlader, M.N.A., Chou, S.K. and Ulah, M.Z., 2000, *The performance of a solar assisted heat pump water heating system*, Applied thermal engineering, 21, 1049-1065

- Kandırmış, G.,2017. *Isı Pompası Destekli Güneş Enerjili Bir Su Isıtma Sisteminin TRNSYS Programı İle Simülasyonu* (yüksek lisans tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kalogirou, S.A., 2004. *Solar thermal collectors and applications*, Progress in Energy and Combustion Science. doi:10.1016/j.pecs.2004.02.001
- Kuang, Y.H., Wang, R.Z. and Yu, L.Q., 2003, *Experimental study on solar assisted heat pump system for heat supply*, Energy conversion and management, 44, 1089- 1098
- Kılıç, H. (2006) *Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompasının Tasarımı, İmalatı ve Performans Deneyleri*, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi, Ankara, 80s.
- Molinaroli, L., Joppolo, C., ve De Antonellis, S. (2014). *Numerical analysis of the use of R-407c in direct expansion solar assisted heat pump*. Energy Procedia, 48, 938-945.
- Mumovic D.,Santamouris M.,2009. An Integrated Approach to Energy, Health and Operational Performance .*A Handbook of Sustainable Building Design and Engineering* : 89-92.
- Patlar, Ö.,2006. *Toprak Kaynaklı Isı Pompalarında Ekserji Analizi* (yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Poppi, S., Sommerfeldt, N., Bales, C., Madani, H., Lundqvist, P., 2018. *Techno-economic review of solar heat pump systems for residential heating applications*. Renew. Sustain. Energy Rev. 81 July 2017 , 22–32. doi:10.1016/j.rser.2017.07.041
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. and Pout, C. (2008). *A review on buildings energy consumption information*. Energy and Buildings, 40(3), 394–398.
- Tırış, Ç. Ve Varol, H.S., 1994, *Sıvılı düzlemsel güneş kolektörlerinin optimizasyonu, imalatı ve Türkiye’ nin farklı bölgelerine uygulamaları*, Tübitak-M.A.M. Matbaası, Kocaeli, 56-60 s.
- Şensoy, B. (2019). *Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası Sistemlerinin Performans Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 128s.
- Özgener, Ö. ve Hepbaşlı, A., 2007, *A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems*, Renewable and sustainable energy reviews, 11, 482-496
- Öztürk, M.M. ve Erbay, L.B. (2012) *An experimental analysis of air source heat pump water heater*, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 32 (1) : 117-127.
- Varınca, K.B., Gönüllü, M.T.,2006. *Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma*, UGHEK I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 21-23 Haziran, ESOGÜ, Eskişehir, 270-275s.

- Yamankaradeniz, R., ve Horuz, I. (1998). *The theoretical and experimental investigation of the characteristics of solar-assisted heat pump for clear days*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 25, 885-898.
- Yalun, M., Li, B., Liu, C., Su, S., Xiao, H., Zhu, C., 2020. *Design and experimental investigation of a phase change energy storage air- type solar heat pump heating system*. Appl. Therm. Eng. 179 May , 115506. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115506
- Yamaç, Ö., 2005, *Güneş enerjili destekli ısı pompalarının teorik incelenmesi*, Master Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 95s.

“

BÖLÜM 2

**AHŞABIN ÖZELLİKLERİ İLE
GELENEKSEL AHŞAP YAPI SİSTEMLERİ
VE RESTORASYONLARININ
İNCELENMESİ**

Varol KOÇ¹

”

¹ Doç.Dr. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, ORCID ID : 0000-0003-4810-3845

GİRİŞ

Ahşap, barınma amacıyla yapılan yapılarda kullanılan ilk malzemelerindendir. Bu malzeme, önceleri üst üste yığılarak barınma hacimleri oluşturmak için kullanılmıştır. Zira doğadaki unsurlar, öncelikle, insanın malzemeleri yığarak bir mekan oluşturabilmesi yönünde örnekler oluşturmuştur. Yani yığma sistem, yapı yapım teknikleri açısından en ilkel ve temel sistemdir. Zamanla insanlığın gelişmesi, doğada çok da fazla örneği olmayan karkas sistemlerin yapı yapım tekniğinde kullanılmasını doğurmuş, ahşap, bu teknik için de en baş malzeme olarak değerlendirilmiştir. Kültürel evrimin, yapı yapım tekniklerinde de birikimli olarak gelişmesi sonucu, daha ilk çağlardan itibaren en temel yapı malzemeleri ve teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. Öyle ki, zaman içre gelişen geleneksel malzeme seçim kullanım bilgisi, günümüz modern tekniklerinden çok az farklılık gösterir. Paleolitik (kaba- yontma taş devri) çağda insanların barınak olarak kullandığı mağaralarda, taş malzemenin bir yapı malzemesi olmadığı, sadece avcılık ve hayvanlardan korunmak amacıyla üretilen çeşitli araçlardan ibaret olduğu söylenebilir. Daha sonraki inşaa faaliyetlerinde taş, ahşapla birlikte insanların kullandığı en eski malzeme olmuştur. Ahşap, taştan sonra doğadaki haline en yakın malzeme olduğundan dolayı, İlk Çağ'dan beri yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ahşabın çokça tercih edilmesinin bir nedeni, yapıda farklı işlevlerde kullanılabiliyor olmasıdır. Örneğin geleneksel Türk Evinde genellikle, tavan, çatı, üst kat duvarlarının oluşumunda, kapı, pencere gibi yerlerde kullanılmıştır. Olumsuz çevresel etkisi olmadığı gibi, esnek, sürdürülebilir, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, çevre dostu, geri dönüştürülebilir malzemelerdendir. Ahşap tercihinin bir nedeni de, canlı bir malzeme olması ve bunun sayesinde, yapıda sıcaklık etkisi vermesidir. Ayrıca basınca, çekmeye, eğilmeye ve kesme kuvvetine karşı direnci fazla bir yapı malzemesi olma özelliği gösterir. Nispeten ucuz bir malzeme olması, ekonomik açıdan bir avantaj sağlarken, yanma ve çürüme tehlikesi bulunduruyor olması dezavantaj oluşturmaktadır. Ahşap, yapılarda sadece tek taşıyıcı eleman malzemesi olarak kullanılmamaktadır; aynı zamanda başka taşıyıcı sistem malzemeleriyle inşa edilen yapıların ahşap malzeme yardımıyla desteklendiği de görülmektedir. Özellikle Türkiye'de Ege ve Akdeniz bölgelerindeki tapınaklarda ahşap malzemelerin etkisi gözlemlenmektedir. Türk Geleneksel Mimarisinde ahşaba, kerpiçle birlikte çok sık rastlanılmaktadır. Çoğunlukla Karadeniz, Marmara ve Akdeniz gibi ağaçlık bölgelerde yerel ve çevreyle ilgili bir malzeme olduğundan, ahşap, yapı malzemesi olarak çokça kullanılmıştır. Türklerin yaptığı ilk ahşap yapılarda, yığma sistemin üzerine uygulanan ahşap karkas yapım teknikleri görülmektedir. Türkler; yazı yurt adı verilen çadırlarda, bulunduğu bölgeye bağlı olarak, kış ise ahşap ve kerpiç yapılarda geçirmektedir. İlk Çağlardan sonra da

ağşap yapım teknikleri Anadolu’da giderek gelişmiş ve yapılarda sıkça kullanılmıştır. Endüstri Devrimi sonrasında sanayileşme ve makineleşme sayesinde de yaygınlaşmıştır (Batur 2004, Koç 2021).

AĞŞABIN FİZİKSEL KİMYASAL MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Doğadaki binlerce tür ağaç tipinin her biri farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler göstermektedir. Üretilcek ağşap elemanın niteliğine bağlı olarak, seçilecek ağaç türü de farklı olacaktır. Tasarımcının, hangi ağşap ürünü için hangi ağacı kullanması gerektiğini bilmesi önemlidir. Ağaçların, kök, gövde ve dallardan oluşan bir taşıyıcı sistemi vardır. Gövde, yer çekimine ve rüzgar etkisine karşı dayanır; köklerin emdiği su ve mineralleri ağacın en üst kısımlarına kadar ulaştırır. Kuru ağşabın temel kimyasal bileşenleri, selüloz, hemi- selüloz, lignin ve ikincil maddelerdir. Selüloz, ağaç hücrelerinin hücre duvarlarını oluşturur. Bu nedenle, %50’lik oranla, en çok bulunan maddedir. Hemi selüloz, selüloz ile ilişkili olup, düşük ağırlıklı yedi farklı şeker polimerinden oluşmaktadır. Ağacın yapısında bulunma oranı, % 20- 35 civarındadır. Lignin yapısında ise, hücreleri birbirine bağlayan (bir nevi harç görevi gören) 3 boyutlu fenilpropanol polimer mevcuttur. Lignin yumuşak odunlarda %23- 33, sert odunlarda ise % 16- 25 oranında bulunur. İkincil maddeler, reçine, sakız veya yağ gibi öz sıvılardır. Ağacın türüne göre, bulunma oranları, % 5 – 30 arasında değişir (Kaz, 2022)

Ağacın fiziksel yapısında ağacın en kesitinde izlenen bölümler dıştan içe doğru, dış kabuk, iç kabuk, saydam kısım (kambiyum), alburnum, yaz halkaları, ilkbahar halkaları ve merkezde öz kısmıdır. Ağaç, bir öz etrafında toplanan iç içe geçmiş halkalardan meydana gelir. Pek çok liften oluşan bu halkalar bahar ve yaz aylarında meydana gelirler. Yıllık halka genişliği, ağşabın yüzey sertliği, özgül ağırlığı ve direnç özellikleri gibi özelliklerinde etkili olmaktadır. Bunun yanı sıra yıllık odun halkaları meydana gelirken, yılın belli dönemlerinde farklı kalınlıklarda oluşmaktadırlar. İlkbaharda meydana gelen yıllık halkaların (erken odun), kambiyumun daha çabuk büyümesinden dolayı, çapları daha kalın ve çeperleri ince olmaktadır (Kara, 2017). Selüloz sayesinde ağşap, eğilme ve çekmeye karşı dayanım göstermektedir. Hemiselüloz hücre duvarını güçlendirir; bu sayede ağşabın basınca karşı mukavemetini sağlar. Ayrıca ağşap doğal dirence sahiptir. Odun, bitkiler arasında dayanımı en yüksek olanıdır (Batur, 2004).

Ağşabın dış görünüş, sertlik ve özgül ağırlık gibi bazı fiziksel özellikleri için ise özetle şunlar söylenebilir: Her ağacın kendine özgü bir rengi vardır; bu renkteki ton farklılıkları ağacın kuru olup olmadığına, iyi büyüyüp büyümediğine dair bilgi verir. Mantarlardan zarar görmüş

ağaçların kokusu, sağlam olanlarına göre daha farklı ve kötüdür. Sertlik, ağacın mukavemeti hakkında kesin ve doğru bir bilgi vermez; fakat ağacın işlenmesi ve aşınmaya dayanımı bakımından önemlidir. Ahşapta bulunan ilkbahar ve yaz odunu oranı, yıllık halka genişliği, ağacın yaşı ve bünyesindeki su, özgül ağırlığı değiştirmektedir. Bu etkenlerden ilkbahar odunu oranının artması genellikle özgül ağırlığı arttırırken, ladin gibi ağaç türlerinde ise yaz odunu oranının artışı özgül ağırlığı arttırmaktadır (Çağlayan, 2020).

Fiziksel özellikleri açısından, en hafif ahşap, birim ağırlığı 430 kg/cm³ olan ladin ve köknar; en ağır ahşap ise, birim ağırlıkları sırasıyla 890 kg/cm³ ve 860 kg/cm³ olan meşe ve kayındır. Bu aralıklar arasında, birim ağırlıkları açısından en hafiften en ağıra diğer bazı ahşap malzemelerin sıralaması şu şekildedir: Kavak, çam, ıhlamur, kestane, karaağaç, gürgen, dişbudak. Deformasyon kabiliyetine %16,2 ile en çok gürgen ve %15,5 ile kayın sahiptir. Bunları sırasıyla ıhlamur, kestane, karaağaç, dişbudak, kavak, meşe, çam takip eder. En az deformasyon kabiliyeti ise, %11,5 ile ladin ve %12,2 ile köknara aittir. Isı iletkenlik katsayısı, kayın, meşe ve dişbudakta 0,20 W/m.K. iken, çamda 0,13 W/m.K.'dir (Aktar, 2017).

Mekanik özellikleri açısından, maksimum çekme dayanımı 165 MPa ile dişbudak ve 135 MPa ile gürgen ve kestaneyle ait olup, minimum çekme dayanımına 62 MPa ile köknar ve 66 MPa ile kayın sahiptir (Okka, 2020). Sahip olunan en büyük çekme dayanımından en küçük çekme dayanımına diğer bazı ahşap malzemelerin sıralaması şöyledir: Çam, karaağaç, meşe, ıhlamur. Basınç dayanımları ise en yüksekte en düşüğe şöyle sıralanabilir: 66 MPa ile gürgen, 61 MPa ile meşe, 56 MPa ile karaağaç, 52 MPa ile 31 MPa arasında sırasıyla ıhlamur, dişbudak, kestane, kavak, çam, köknar, kayın, ladin. En büyük eğilme dayanımı 130 MPa ile gürgen, 120 MPa ile dişbudağa ait iken, en küçük eğilme dayanımı 52 MPa ile kavak, 65 MPa ile çama aittir. Eğilme dayanımları açısından diğer ahşapların büyükten küçüğe sıralanışı şu şekildedir: ıhlamur, meşe, kestane, karaağaç, kayın, köknar, ladin. Makaslama dayanımında ise büyükten küçüğe, 12 MPa ve 11 MPa ile dişbudak ve meşeyi, kestane, gürgen, karaağaç, kavak, kayın, köknar izlemekte, en düşük makaslama dayanımına ise 3,6 MPa ve 4,5 MPa ile çam ve ıhlamur sahip olmaktadır. En büyük Elastisite modülü ise, 16.200 MPa ile gürgen, 13.400 MPa ile dişbudağa ait iken, en düşük elastisite modülleri 7.000 MPa ile kavak ve 7.400 MPa ile ıhlamura aittir. Diğer ahşapların elastisite modülü sıralaması en büyükten en küçüğe şu şekildedir: Kayın, meşe, karaağaç, çam, kestane, ladin, köknar. Brinel sertlik derecesi ise en büyük değerler olarak 71 HB ve 65 HB ile gürgen ve dişbudağa, 19 HB ve 23 HB ile köknar ve çama aittir.

Diğer ahşap malzemelerin sertlikleri ise büyüktür küçüğe şöyledir: Meşe, kayın, karaağaç, kestane, ladin (Hanedar, 2021).

Ahşabın mukavemet/ağırlık değeri yüksektir. Bunun nedeni lifli ve boşluklu bir yapısı olmasıdır. Liflerin yük altında birbirinden ayrılarak, birbirini ezerek ya da çekme etkisiyle bireysel kopmalara uğrayarak bozulması uzun sürdüğünden gerilme- birim şekil değıştirme grafiğı, diğer yapı malzemelerinden farklıdır. Bu sayede, aşırı ani yüklemelere maruz kalmadıkça, ahşap malzeme ani çökmelere uğramaz. Bu açıdan özellikle taş ve beton gibi gevrek ve yarı gevrek malzemelere göre büyük bir avantaja sahiptir. Hatta betonarmeye ve kısmen çeliğe göre ahşabın bu kabiliyeti, bu konuda daha iyi bir performans göstermesini sağlar. Temel yapı taşı ağaç olan suni ahşap malzemelerde de kısmen bu özellik korunmaktadır. Hatta doğal ahşabın dezavantajı olan lif yönlerine göre mukavemet değeri yüksek çok büyük farklılıklar göstermesi durumu, suni ahşap malzemelerde, homojenlik ve izotropluk iyi bir şekilde oluşturularak ekarte edilebilir. Ek olarak suni ahşap malzemeler, istenilen özelliklere göre özel olarak üretilebilir. Ancak ahşabın ve kısmen suni ahşap malzemelerin organik kökenli olmaları, bozulmaya müsait oldukları anlamına geldiğinden, emniyet katsayılarının yüksek alınması gerekir. Bunun yanında dezavantaj olan diğer bazı önemli özellikleri şöyle sıralanabilir: Rutubet karşısında gösterdikleri fazla deformasyonlar ve mukavemet düşmesi, mikroorganizma etkisi ile bozulmaları ve lif yönlerine göre mukavemet değeri yüksek farklılık göstermesi. Avantaj olan önemli özellikleri ise, ısı ve ses tutuculuk değeri yüksekliği ile atmosferik ve kimyasal etkilere karşı dayanımları olarak belirtilebilir. (Şirin & Aydemir, 2016).

Ahşap malzemede su, selüloz ve ligninin kristal suyu, selülozun hidroskopikliği nedeniyle bünyesine emdiği su ve hücre aralarını veya boşluklarını dolduran serbest su olmak üzere, üç şekilde bulunmaktadır. Örneğin su ile temas eden bir ahşap %200, yeni kesilmiş iğne yapraklı bir ağaç %130- 60, suni kurutma yoluyla kurutulmuş bir ahşap ise %12 rutubetli durumdadır. Ahşabın bulunduğu ortamın rutubetini alması nedeniyle, tam kuru (%0) halde bulunması mümkün değildir. Belli bir değerden sonra sabit kalan su miktarı en fazla %30'dur. Bu nedenle ahşap bünyesine giren su ile selüloz dokusu ve bağları şişmeye, eksilmesiyle de büzülmeye uğrar ve bu durumun etkisiyle birtakım çatlaklar meydana gelir. Bu deformasyonlar genellikle ahşabın en fazla teğet, en az aksiyal yönünde görülmekte ve geniş yapraklı ağaçlarda iğne yapraklı türlere oranla daha fazla olmaktadır. Ahşap, iç yapısının hava boşluklu dokusu ve bünyesindeki selüloz nedeniyle sıcak- soğuga karşı geçirimsiz, ayrıca ses tutucu bir malzemedir. Ancak bu değerler ahşap türlerine ve lif yönlerine göre de farklılık göstermektedir. (Var 2001, Koç 2021).

Ahşap dokusu, selüloz ve ligninden beslenen bakteri, mantar, böcek ve kurtlar tarafından hızla ayrıştırılmakta ve kesiti zayıflayarak parçalanmaktadır. Bu tür canlılardan bir kısmı ahşapta yumurtlamak ve yaşamalarını sürdürmek için birtakım delikler açmakta, ancak önemli bir kısmı da beslenmek için ahşabın selüloz ve ligninini kimyasal ayrışmaya uğratarak malzemeyi kısa zamanda toz haline getirmektedirler. Örneğin karanlık, rutubetli ve sıcak ortamda *Merilius Lacrimans* adlı mantar birkaç ay gibi kısa bir sürede ahşabı tamamen tahrip etmektedir (Kaba, 2002). Ahşap, açıkta 30-120, tatlı suda 50-500, rutubetsiz, bakım altında 500-1000 sene dayanım gösteren bir malzemedir. Ancak bu dayanım toprakta 4- 12 sene, su ve hava ile devamlı temas ettiği yerlerde ise bu sürenin de altına iner. Ahşap, güneş etkisi ile sürekli bir yanmaya (oksidasyon) uğrayarak kararmakta ve ısı etkisiyle (145 C°) kimyasal ayrışmaya uğramaktadır. Yanma hızı malzemenin kesitine, rutubetine ve reçine miktarına göre değişik değerler gösterir. Genellikle yanıcı bir malzeme olması nedeniyle, yapıda kullanılırken ateşe karşı bazı önlemlerin alınması gerekmektedir (Çalışkan et al 2002).

GELENEKSEL AHŞAP YAPI SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Geleneksel Ahşap Yapılar:

Geleneksel Türk Mimarisinde sıkça kullanılan ahşabın, büyük yapılarda işlendiği ve yapım için uygun hale getirildiği, ev gibi küçük yapılarda genelde az işleme, doğadan alındığı haliyle kullanıldığı görülmektedir. Ancak geleneksel ahşap Safranbolu Evinde olduğu gibi, ahşap, 19. Yüzyıldan sonra baş, dal, dış tabaka, gövde, kök gibi gruplara ayrılarak küçük yapılarda da işlenerek kullanılmaya başlanmıştır. Odun böyle kategorilendirildikten sonra, eğer taşıyıcı olarak kullanılacaksa, kabukları ve yüzeyleri soyulur; budakları temizlenirdi. Hatta taşıyıcı dikmeler farklı tasarlanarak estetik bir görünüm oluşturulurdu (Bozkurt & Altınçekiç, 2013). Bu tasarımlar yöreden yöreye değişmekteydi. Ne kadar ahşap yapılar yapılırken tüm bölgelerde belirli prensipler üzerinde durulsa da, farklılık gösterdikleri alanlar da oluyordu. Bunun en büyük nedeni iklimin ve bu iklimlerde yetişen ağaç türlerinin farklı olmasıydı. Farklı iklimlerde yetişen sert ya da yumuşak ağaçlar farklı işlendiğinde, tasarımlarda da farklılıklar ortaya çıkmıştır. Örneğin, Kuzey Anadolu'da sert ağaçlar yetiştiğinden ahşaba balta ile yontarak, Akdeniz'de yumuşak ağaçlar yetiştiğinden kama ile işlenerek şekil verilmekteydi (Çobancaoglu, 2003).

Yaşanan depremlerde geleneksel ahşap sistemlerin genel olarak betonarme yapılardan daha az hasar almış olmaları, bazı araştırmacıların dikkatini geleneksel ahşap yapılar üzerine yoğunlaştırmasına neden ol-

muştur. Betonarme ve çelik yapıların kullanımı ile ihmal edilen ahşap yapıların, şiddetli sarsıntılara dayanmaları sayesinde önemi artmıştır. Geleneksel yapım tekniği olan yığma yapım tekniği, çok eskiden beri kullanılmaktadır (Koç, 2016). Yığma sistemde üst üste getirilmiş ağaç gövdeleri duvarları oluştururken, aynı zamanda taşıyıcı sistem görevini üstlenmektedir. Su basman seviyesine kadar betonarme yapılar üzerine ahşap yığma sistemle devam edilmesi gibi, günümüzde, diğer bazı malzemelerle birlikte de uygulanmaktadır. Yığma sistemlerde kullanılan ahşabın kesit alanı dairesel, kare ya da dikdörtgen olabilmektedir. Yapı ahşapları birbirine metal bağlantı veya ahşap kavelalar ile bağlanır. Karkas sistemde ise tek boyutlu ahşap bileşenler iskelet olarak taşıyıcılık görevini üstlenirken, duvarlar sadece yapı içini bölmek ve yapıyı çevrelemek gibi görevleri üstlenir. Yapıyı kuran ahşap bileşenlerden oluşan iskeletin arasındaki boşluklar kerpiç tuğla ya da gaz betonla doldurularak yüzeyler elde edilmektedir (Yaman, 2007).

Ahşap Kütük ve Yığma Ahşap Yapılar:

Ahşap kütük yapılar, duvarın masif ahşap ile oluşturulduğu yapılar-
dır. Ahşap kütük yapılarda ayrıca bir duvar kaplaması kullanılmaz. Çünkü
ahşap zaten estetik bir görünüme sahiptir ve kaplanması gerekmez. Bu tür
yapılar, yığma görünümlü de olsa, her zaman yığma taşıyıcı sisteme sa-
hip olmayabilirler. Zira dikmeli kütük yapım yöntemlerinden biri, duvarın
taşıyıcı olarak kullanılmadığı yöntemdir. Taşıyıcı olan ise, karkas yapı-
larda olduğu gibi, düşey ahşap dikmelerdir. Bu tür yapılarda yatay ahşap
kütükler, bölme duvar görevi gören, direk taşıyıcı olmayan elemanlardır.
Kütüklerin birleşim noktalarında bitümlü köpükler kullanılabilir. Bölme
duvar da olsa, duvarın yıkılmama mukavemeti için kütüklerin birbirlerine
bağlanması çok önemlidir. Yatay olarak üst üste konulup duvarı oluşturan
kütüklerin bağlanmasını sağlayan uzun çiviler, yatay kütük yüksekliği-
nin 2,5 katı olmalıdır. İkinci yapım yönteminde de, yine kütükler taşıyıcı
niteliğinde değildir ve birbirlerine triton vidalarla ya da çivilerle bağlan-
mışlardır. Üçüncü yapım yönteminde, ahşap dikmeler yerine yapıda çelik
putrelden (taşıyıcı ince çelik ya da dökme demir profiller) oluşan taşıyıcı
dikmeler bulunmaktadır. Bölme duvarların, genellikle ana dikmeler
boyunca açılan lambalara geçirilen dikdörtgen kesitli işlenmiş kalaslarla
oluşturulduğu, artık ahşap kütüklerin değil kerestelerin kullanıldığı karkas
ahşap sistemler de yapılabilmektedir. Yatay kütüklerin oluşturduğu, ahşap
duvarların taşıyıcı konumunda olduğu yapılar ise, yığma ahşap yapılarıdır.
Bu teknikte yatay kütüklerin birbirlerine, diğerlerinde olduğu gibi uzun
çiviler ya da triton vidalarla bağlanması yerine, taşıyıcı sistem elemanı
oldukları için, çelik putreller ile bağlanıp desteklenmesinde büyük fayda
vardır (Orhan et al 2019).

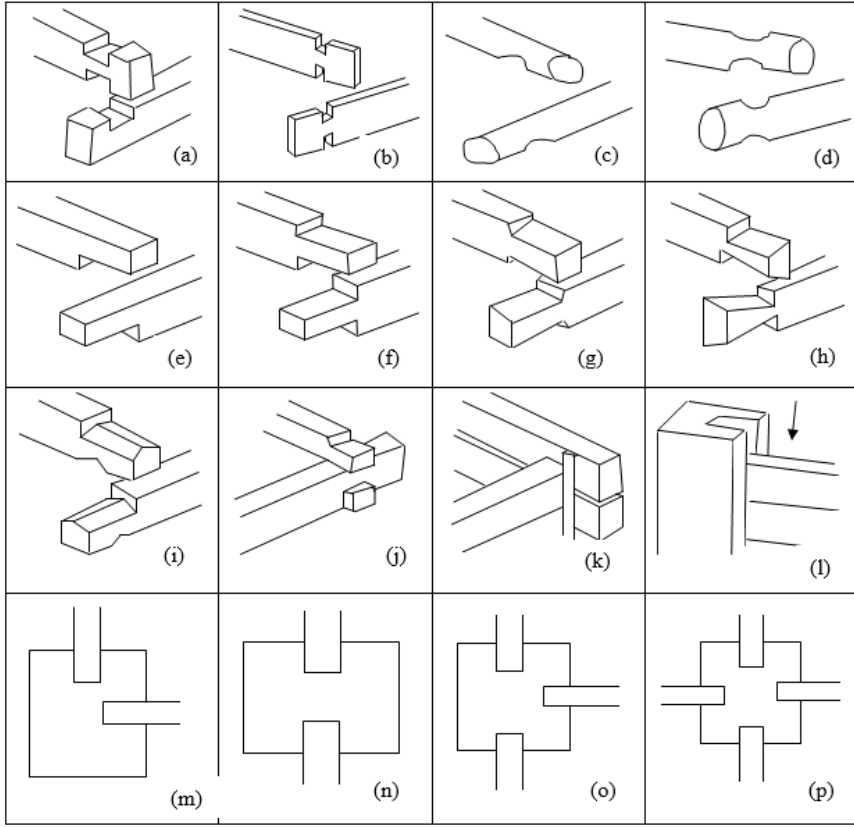
Ahşap kütük ve yığma ahşap sistemler, ağaç kütüğü ve kerestenin bol ve ucuz olduğu bölgelerde tercih edilen bir ahşap yapı sistemidir. Kütük ağaçla veya işlenmiş kereste ile inşa edilebilirler. Yatay kütükler, duvar köşesi yapan yerlerde, birbirleriyle marangoz geçmesini sağlayan farklı oyukluk oluşturma yöntemleri ile şekillendirilirler (Batur, 2004). Köşe birleşimleri geçme detayı oranlarına göre boğaz, kurt boğazı ve kara boğaz geçme gibi isimler alırlar (Şekil 1). Ahşap yığma yapılar kârgir bir temele oturan şekilleriyle konut olarak kullanımlarının yanı sıra, kütükten soyma ayaklara oturtularak özellikle Doğu Karadeniz bölgesinde zahire ambarı olarak kullanılmaktadırlar (Çağlayan, 2020). Ahşap blokların az işlem görerek üst üste yığılmasıyla oluşturulan taşıyıcı duvarlı ahşap kütük yığma yapıların duvar yerleri projede belirlenir ve daha sonrasında her hangi bir değişikliğe elverişli değildir. Bu gibi sistemlerde karşılaşılan önemli bir sorun, birleşim yerlerindeki yalıtım sorunudur. Karşılaşılan bu yalıtım sorunlarının giderilmesi, ahşap üzerinde yapılan işlemin artmasıyla orantılıdır. Bu amaçla, boşluklu, kütük, blok ve dolma ahşap yığma sistemler yapılabilir (Ayaz, 2011). Ahşap yığma sistemlerin bazı birleşim çeşitleri Şekil 1.'de gösterilmiştir (Tuna 2008, Mısırlı 2022).

Ahşap Karkas Yapılar:

Ahşap malzemenin yığma olarak kullanılmasıyla yapıdaki esneklik yok olur ve aynı zamanda maliyet yükselir. Dolgu malzemesi yerine de geçen yığma sistem yerine, iskelet sistemde ahşabı kullanmak maliyeti düşürür, aynı zamanda yapıdaki gereksiz ağırlıkları azaltır. Ancak yüksek ahşap yapılar için, alt katların ve/veya çekirdek bölümün yığma ahşap, üst katların ve/veya çekirdek bölüm etrafındaki kat alanlarının iskelet ahşap sistem yapılmasıyla, farklı mühendislik çözümleri üzerine çalışmalar yapılabilir. İskeleti ahşap olan yapılarda taşıyıcı kısımlar, dikme, yatay ve çapraz olarak üç gruba ayırabilir. Betonarme yapılardaki çalışma prensibi gibi, dikmeler kolon- düşey taşıyıcı elemanlar olarak düşünülebilir. Dikmelerin üzerine yatay malzeme kullanılarak çerçeve sistemi oluşturulur. Desteklemek için çaprazlar kullanılır. Yataydaki yükler dikmelere aktararak kat oluşturulur. Dolgu malzemeler ise taşıyıcılığı olmadan, sadece mekan oluşturmak için kullanılır. Örneğin geleneksel çözümlerde bağdadi sıra, bölme duvarlar için kullanılır (Ayaz, 2011).

Ahşap karkas sistem, temel, bodrum, zemin veya katlarında yığma kârgir duvarlara oturan, taşıyıcı sistemleri ahşap iskelet olan yapılardır. Yapıya etki eden yükler, yatay, düşey ve diyagonal elemanlarla karşılanarak kârgir malzeme ile inşa edilmiş normal, zemin, bodrum kat veya temel aracılığıyla zemine iletilirler. Yatay taşıyıcı elemanları, ahşap tabanlar, başlıklar, döşeme kirişleri, dikme ara bağlantılarından; düşey taşıyıcı elemanları, ahşap dikmeler ve ara dikmelerden; diyagonalleri, ahşap

payandalardan oluşturulur. Ahşap karkas yapılar dikmelerin oturduğu tabanların sayısına göre, tek veya çift tabanlı olarak isim alırlar. Her iki yönde tek tabanlı ahşap iskeletli; bir yönde tek, diğer yönde çift tabanlı ahşap iskeletli veya her iki yönde çift tabanlı ahşap iskeletli yapı olarak adlandırılırlar. Alt taban döşeme kirişlerinin üzerine oturtulduğu için çift tabanlı sistemde, bir yönde devam eden döşeme kirişlerinin sonuncusuna diğer yönde döşeme kirişleri saplanarak diğer tabanın oturacağı mesnetler oluşturulur. Ahşap karkas yapılarda yapı köşeleri ve pencere kenarlarına yerleştirilen ana dikmelerin aralarına kesit olarak daha ince ara dikmeler yerleştirilir. Bunun nedeni kat yüklerini alt tabana düzgün yayılı olarak iletebilmenin yanı sıra iç veya dış sıvaların üzerine uygulanacağı bağdadi çıtalarının çakılması, karkas içi dolgusunun yapılması veya dış kaplama çakılabilmesi için alt yapının hazırlanabilmesidir (Çağlayan, 2020). Ahşap karkas yapı duvarları, yapı cephe duvarları oluşturulurken, dış köşelere ve pencere kenarlarına ana dikmeler, bunların arasına ara dikmeler ve bu dikmeler arasına da diyagonal çubuklar yerleştirilerek inşa edilirler. Dış duvarların karkası iklim ve malzeme koşullarına göre, dolgusuz veya dolgulu olabilir. İç duvarların kurgusu da dış duvarlarda olduğu gibi köşeler ve kapıların kenarlarında ana dikmeler, bunların arasında ara dikmeler ve diyagonaller yerleştirilmesi ile oluşturulur. Ahşap karkas yapılar, dış duvarlarının dolgulu veya dolgusuz olmaları ve cephe kaplamalarının sıvasız, sıvalı ve ahşap kaplamalı oluşları ile farklılıklar gösterirler. Yapıyı rüzgâr, yağmur, kar gibi çeşitli atmosferik koşulların yanı sıra ısı değişikliklerinden koruyan kaplama farklılıklarında bölge, coğrafya, iklim ve ekonomik koşullar oldukça büyük önem taşırlar (Avlar ve Yıldırım, 2021). Karkas yapının dış duvar içlerinin herhangi bir kârgir malzeme ile doldurulmayıp boş bırakıldığı duvarlara, boşluklu duvarlar denir. Ahşap karkas yapılar, cephe kaplamalarının çeşidine göre de sınıflandırılabilirler. Cephe kaplamaları başlıca 3 tiptir:



Şekil 1. Ahşap duvar elemanları birleşim yöntemleri (a) Kilit yuva (b) Kurt boğazı geçme (c) Semer yuva (d) Kara boğaz geçme (e) Yarım bindirme yuva (f) Tam bindirme yuva (g) Yarım kırlangıç (h) Tam kırlangıç (i) V tipi yuva (j) Kesişen duvar birleşimi (k) Destekli kesişen duvar birleşimi (l) Tek yönlü çalma boğaz (m) Komşu çift yönlü çalma boğaz (n) Karşı çift yönlü çalma boğaz (o) Üç yönlü çalma boğaz (p) Dört yönlü çalma boğaz

a) Ahşap Kaplama: Daha çok Marmara Bölgesinin Kuzeyi, Trakya ve İstanbul'da gözlemlenen bir cephe düzenidir. 18. yüzyıl sonları ve 19 yüzyıl başları arasında geçen seneler içinde Marmara Bölgesi'nde ve öncelikle İstanbul ve Rumeli yörelerinde evler ahşap kaplama yapılmaya başlamıştır. Kaplamalar düşey ve yatay yapılabilir. Genellikle rastlanılan türü, yatay kaplamadır. Kaplama tahtaları genellikle çamdan olur. Karadeniz bölgesinde suya dayanıklılığı ve bol bulunması nedeniyle en çok kestane ağacı kullanılır. Zaman içerisinde boyut ve detay farklılıkları içermekle birlikte, esas amacı yağmurun yapı içerisine girmesine engel olmaktır. Geçmeli ve bindirmeli olarak inşa edilirler. Yatay kaplamalar nem yalıtımı dışında yatay kuvvetlere karşı da yapıya dayanım kazandırır (Bostancıoğlu ve Birir, 2004).

b) Bağdâdi Sıvalı Duvarlar: Ahşap karkasın doldurulmadığı ve son yüzyıllarda görülen bir yöntemdir. Ahşap karkasta meydana getirilen boşlukla ahşabın hava alması ve uzun süre dayanımı sağlanmaktadır. Kimi zaman dolgulu ahşap duvarlarda da bağdâdi çıta ve üzerine sıva uygulaması görülmüştür. Barok dönem yapılarının eğri yüzeyli çıkmaları ve saçaklarının kolaylıkla uygulanması da bu yöntemle sağlanmıştır. Kullanılan bağdâdi çıtası ölçüleri 1-2x2 cm ve 1-2x3 cm'dir, Bu çıtaların düzgün bir şekilde belirli metrik ölçülerde olmayan keserle yontulmuş çeşitli ebattaki uygulamalarına da sıklıkla rastlanmaktadır (Peker, 2012).

c) Dolgulu Duvarlar (Hımiş Yapı): Ahşap karkas yapının dikme taban ve kirişleme aralarının bölgelere göre kerpiç, tuğla veya taş malzeme ile doldurulmasıyla inşa edilen yapı türüdür. Anadolu'nun farklı bölgelerinde farklı malzemelerle uygulanmış örnekleri bulunmaktadır. Önceleri genellikle kârgir malzemenin sanatlı bir biçimde işlenmesi şeklinde görülen hımiş tekniğinde daha sonra bu ifade yerini sade bir anlatıma bırakılmıştır. Hımiş sistemin farklı özellikler gösterdiği bölgelerden birisi Karadeniz bölgesidir. Burada da ahşap çatkının geometrik şekline göre kare biçimindeki çatki boşluklarının taş malzeme ile doldurulması ile oluşturulan göz dolması biçimine ve üçgen biçimindeki çatki boşluklarının kârgir malzeme ile doldurulması ile muska dolgusu yöntemine rastlanılmaktadır. İç Anadolu ve Batı Anadolu bölgelerinde ise balık sırtı ve düz tuğla dolguya rastlanmaktadır (Aksoy, 2005).

Ahşap karkas yapılarda iç duvarlar da dış duvarlarda olduğu gibi, dikmelere çakılan 1- 2 x 2cm,

1- 2 x 3 cm boyutundaki ahşap çıtalara sıva telinin gergin bir şekilde tespit edilmesinden sonra üzerine sıva yapılması ile oluşturulurlar. Kirişler genellikle 40- 50 cm ara ile kârgir duvarların içine veya üzerine ve ahşap tabanlara oturtulur. Kiriş döşenme yönü, eğilme zorlanmasının kısa mesafelerde daha az olmasından dolayı, dar açıklık istikametindedir. Eğilme atalet momentini katlamalı olarak artırması nedeniyle de, kirişlerin geniş kenarları, yükseklği doğrultusunda olur. Döşemelerde kullanılan ahşaplar genellikle çıralı veya çırasız çamdır. Eğer döşeme toprak üzerinde oluşturuluyorsa, neme karşı meşe veya kestane ağaçları kullanılır. Döşemeler binadaki yerlerine göre üç çeşittirler: 1-) Toprak üzerindeki döşemeler: Kirişlerle döşeme tahtalarından, 2-) İki kat arasında oluşturulan döşemeler: Kirişler, döşeme ve tavan tahtalarından, 3-) Çatı altında oluşturulan döşemeler: Kirişler ve tavan tahtalarından oluşurlar (Batur 2004).

Geleneksel Türk ahşap mimarisinde çatı, kırma çatı biçiminde ve her zaman yatay saçak oluşturulacak biçimde tasarlanır. Çatı strüktürel olarak genellikle yalın bir biçimde ifade bulur. Son dönem çatılarında dereler

çatı alınlıklarının arkasında saklı olarak yapılmıştır. Çatı örtüsünde alaturka ve Marsilya kiremit kullanılmıştır. Marsilya kiremit 19. Yüzyılın ikinci yarısından itibaren Avrupa'dan ithal edilerek kullanılmaya başlanmıştır. Çatı inşaatı, evin iç açıklıklarının fazla olmaması nedeniyle oldukça basit bir biçimde, oturtma çatı olarak çözümlenmiştir. Çatıyı meydana getiren öğeler: bağlama, bırakma kirişi, orta çatı dikmesi, (makas) çift gergi ve payandalardan ibarettir (Polat, 2016).

Geleneksel sistemde ahşap karkas yapı, kârgir duvara genellikle doğrudan oturtulur. Kârgir duvar üzerine yatırılan alt taban kirişlerinin birbirleri ile enine kirişlerle, çeşitli geçme detayları ve çivilerle bağlanmasına rastlanılmaktadır ancak, ahşap kısmın kârgir duvara oturtulmasında herhangi bir metal bağlantı elemanının kullanılmasına genel olarak rastlanmaz. Bu durumun istisnasına, tekil kârgir temele doğrudan oturtulan tekil direklerde, direğin ortasında açılan bir lambaya metal bir zıvananın geçirilmesi şeklinde rastlanmaktadır. Geleneksel yapı sisteminde direklerin köşelerde tabanlarla birleştirilmesi iki şekilde olmaktadır. Birincisinde direk, doğrudan kârgir yapı temelının köşesine oturtulur. Bu durumda direk ve yapı birbirlerine demir bir zıvana ile bağlanırlar. Alt taban ise direk yüzeyine demir bir lâma ile tespit edilir. İkinci birleşim şeklinde kârgir temel köşesinde iki taban kirişi birbirleri ile yarım veya 1/3 kalınlıkla geçme oluşturularak birleştirilirler ve direk de bu birleşim noktasına oturtulur (Aksoy, 2003).

Geleneksel ahşap yapılarda ahşap döşeme kirişleri eğer yapılar bitişik nizamda inşa edilmişlerse, aralarına örülmüş olan 50- 60 cm genişliğindeki yangın duvarına oturtulmuşlardır. Kirişler kargir duvara iki şekilde bağlanırlar (Çağlayan 2020):

1-) Doğrudan oturtma: Bu inşa biçiminde kirişler duvar içerisine sokularak 20- 35 cm oturtulmakla birlikte, duvarda kullanılan bağlayıcı harcın yeterli kalitede olmayışı veya zaman içerisinde özelliğini kaybetmesi nedeniyle kiriş uçları çürümekte ve taşıyıcılık özelliğini kaybetmektedirler. Kirişlerin duvara oturtulmalarının diğer bir sakıncası ise duvar kesitinde zayıflama meydana getirerek taşıyıcı özelliğinin yitirilmesine neden olunmasıdır. Kargir duvar içerisine oturtulan kiriş uçlarının mutlaka katranlanması gerekmele birlikte; bunun ahşaptaki çürümeyi geciktireceği, fakat ahşabın çürümesinin önüne geçemeyeceği açıktır.

2-) Duvar dışına oturtma: Bu oturtma biçiminde, ahşap kirişlerde çürüme boyutu duvara gömülen kirişler kadar olmamakla birlikte, duvarla kiriş arasında bir yalıtım tabakası bulunması gereklidir. Duvar üzerine oturan kirişlerin demir kılıçlarla duvara tutturulmaları döşemeyi daha rijit bir hale getirerek taşıma gücünü artırır. Bağlama ve kılıç demirleri, lama

demirlerinin dövülmesiyle imâl edilirler. Kullanılan lama demirleri 40/10 veya 50/15 mm' dir ve boyları 60-80 cm' dir.

Çatı döşeme kirişleri, ahşap iskeletli sistemin üst tabanına oturur. Çatı mertekleri ise döşeme kirişlerinin üzerine oturtulmuş olan aşığa bindirilir. Çatı döşeme kirişlerinin kârgir duvara oturduğu durumlarda; kirişler duvar üzerine yerleştirilmiş olan ahşap bir hatıl üzerine oturtulabilir. Oturma boyu bir tuğla genişliği veya kirişin yüksekliği kadardır. Ahşabın çürümesine engel olunması için kârgir malzeme ile arasında 2-3 cm mesafe bırakılabilir (Polat 2016).

Ahşap Yapılarda ONARIM GÜÇLENDİRME VE Restorasyon

Ahşap, dışarıdan aldığı nem etkisiyle mukavemetini kaybeder ve bünyesi mantar ve böcek istilasına uğrar. Ahşabın gerekli korunma önlemleri alındığında oldukça uzun bir ömre sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle ahşap mukavemetinin artırılmasındaki esas amaçlar, neme, böcek ve mantarlara, yangına karşı koruma şeklinde sıralanabilir. Ahşap koruyucu maddelerde aranan nitelikler şunlardır: **1-)** Zararlılara karşı etkin olmalı ve bu etkinlik uzun süre devam etmelidir.

2-) Kullanım yönünden güvenli olmalı, uygulayıcılar ve kullanıcılar için tehlike oluşturmamalıdır. **3-)** Ağaç malzemede kalıcı olmalı, kısa sürede, yıkanma veya buharlaşma sonucunda bünyeden uzaklaşmamalıdır. **4-)** Metal aksamda depolandığı tanklarda, bidonlarda ve uygulandığı tesislerde korozyona neden olmamalıdır. **5-)** Yangın tehlikesini artıracak özellikte olmamalıdır. **6-)** Kullanımı ekonomik olmalıdır (Çağlayan, 2020).

Geleneksel ahşap yapılar, geçmişten günümüze bir yaşama kültürünün yansıtıcısı olmakla birlikte; Kuzey Anadolu Fay Hattı'nda bulunan Türkiye'de, tarih boyunca ve çeşitli uygarlık dönemlerinde felaketlere yol açmış olan deprem afetine karşı, yüzyılların deneyimi ile geliştirilmiş bir yapı türü olmuştur. Ahşabın yangına karşı dayanıksızlığı zaman içerisinde kanunlarla ve enbiye nizamnameleri ile kargir yapıların inşasını zorunlu kılrsa da; yaşanan büyük depremler, ahşap yapı inşasını tekrar gündeme getirmiştir. Asırlardır tüm tahrip etkilerine karşın ayakta direnen geleneksel ahşap yapıların deprem karşısında dayanımlarından bahsedebilmek için öncelikle onların harap durumdaki taşıyıcı sistemlerinin güçlendirilmesi gerçeği kaçınılmayacak bir durumdur. Yapıların sismik kontrolünde, deprem etkisiyle yapıya giren enerjinin yapıda oluşturduğu iç kuvvetler ve yer değiştirmeler, güvenlik, servis ve konfor koşullarını kullanarak sınırlandırılmaktadır. Eski ve ayakta kalmış ahşap yapılarda bu prensipler, yapılırken çeşitli geleneksel yöntemlerle kısmen gerçekleştirilmiş olabilir. Bu

prensipleri, eski ahşap yapıya uygulamak, yapılmış betonarme ve yığma yapılara uygulamaktan daha kolaydır ve daha etkili sonuç verir (Avlar ve Yıldırım, 2021).

Tüm onarım- güçlendirme işlerinde olduğu gibi, hatta daha da önemli olarak, restorasyon öncesinde mevcut durumun fotoğraf ve video kayıtlarının alınması gerekir. Restorasyon, yapının değişimini, olabildiğince ilk haline doğru döndürebilme çabasıdır. Dolayısıyla yapının tarihi, estetik ve teknik özellikleri iyi belirlenmelidir. Yasal statü de dikkate alınarak, müdahaleler yapılmalıdır. Ahşabın organik bir malzeme olması, yapının mevcut yerinde maruz kaldığı ve kalacağı etkenleri de dikkate almayı gerektirir. Teknik ve bilimsel yöntemlerle restorasyon yapılması ahşap malzeme söz konusu olduğunda daha da büyük önem taşır. Özellikle yapıdaki taşıyıcı ahşap elemanların basınç, çekme, eğilme, kayma mukavemetlerinin belirlenmesi ve kesit tasarımlarında değerlendirilmesi gerekir. Biyolojik ve fiziksel ahşap zararlılarına karşı koruyucu kimyasallar vernik ve cilalarla malzemede uzun bir ömür oluşturmaya çalışılmalıdır. Tüm bu durumlar tarihi ahşap yapı restorasyonlarının gerçek anlamda yapılabilmesi için maliyetin yükselmesine neden olur. Dolayısıyla günümüzdeki temel yaklaşım, eserlerin belirli aralıklarla bakımının yapılarak korunması ve böylece ileride çıkabilecek daha büyük maliyetlerden kaçınılması şeklindedir (Muratoğlu, 2011).

Restorasyon teknikleri, yapının durumuna göre sınıflandırılabilir. Çok iyi korunmuş, malzemesi işlevini koruyan yapılarda sağlamlaştırma işlemi yapılır. Sağlamlaştırmanın amacı güçlendirme ve bozulma nedenlerini yok etmektir. Bütünleme ise, bir bölümü zarar görmüş yapıların zarar görmüş bölümünü restore edip sağlam bölümüyle bir bütün haline getirmektir. Yenileme, zamanla yaşam biçimi ve ona bağlı istekler nedeniyle işlevini yitirmiş yapıların, restore edilerek farklı bir işlevde kullanılması uygulamasıdır. Çok fazla tahrip olan tarihi yapıların yeni ekler eklenerek işlevlerinin farklılaştırılıp restore edilme uygulamasına ise tarihi ve çağdaş ekler denir. Yeniden yapım, tarihi yapının rölevesi alındıktan sonra yeniden röleve projesine uygun olarak yapılmasıdır. Temizleme, tarihi yapıların etkisini bozan eklerden arındırılması veya yüzey temizleme uygulamasıdır. Restorasyon için eğitim görmüş elemanlar önemlidir. Maalesef restorasyon için en büyük sorun kalifiye elemandır. Yapılan analizler sonucunda kalifiye eleman bulma oranı %27,7' dir. Bu oran da, restorasyon çalışmalarında yaşanan sorunların başındadır. Diğer bir sorun ise mevzuat eksikliği ve izin almak için gereken sürenin uzunluğudur (Özköse, 2014).

Kaynaklar

- Aksoy D.S. (2003) Geleneksel ahşap karkas yapıların deprem davranışları, Dr. T., Danışman: Ahunbay Z., İTÜ Fen Bil. Enst., 369 s.
- Aksoy D.S., Ahunbay Z. (2005) Geleneksel ahşap iskeletli Türk Konutu'nun deprem davranışları, itüdergisi/a mimarlık planlama tasarım, Cilt:4, Sayı:1, s. 47-58.
- Aktar, İ. H. (2017). Yapıda Kaplama Malzemesi Olarak Ahşap ve Ahşap Esaslı Ürün Kullanımının Araştırılması (Doctoral dissertation, Bursa Uludag University).
- Avlar E., Yıldırım H.S. (2021) Deprem mevzuatı bağlamında Türkiye'deki geleneksel ahşap karkas yapı kurallarının analizi, Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, Cilt 20, Sayı 78, s. 1117- 1137.
- Ayaz C. (2011) Çok katlı sürdürülebilir yapı tasarımında ahşabın strüktürel olarak kullanım olanakları ve dünyadaki örnek uygulamalar, Y.L. Tezi, Danışman: Çakır S., Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Bilgisi Ana Bilim Dalı 151 s.
- Batur A. (2004) Gelişmiş ahşap yapım sistemleri ve Türkiye koşulları yönünden değerlendirilmesi, Y.L. Tezi, Danışman: Esin T., Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı 120 s.
- Bostancıoğlu E., Birer E. D. (2004) Ekoloji ve ahşap- Türkiye'de ahşap malzemenin geleceği
- Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 9, Sayı 2, s. 37- 44.
- Bozkurt G. S. & Altınçekiç H. (2013). Anadolu'da geleneksel konut ve avluların özellikleri ile tarihsel gelişiminin Safranbolu evleri örneğinde irdelenmesi. Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University, 63(1), 69-91.
- Çağlayan E.S. (2020) Ahşap yapılar ve Türkiye'de inşaat mühendislerinin / ağaç işleri endüstri mühendislerinin çok katlı ahşap yapılara yönelik görüşleri, Y.L. Tezi, Danışman: Elibol G.C., Hacettepe Ün., Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, Ağaç işleri endüstri mühendisliği A.B.D., 122 s.
- Çalışkan Ö., Meriç E., Yüncüler (2019). Ahşap ve ahşap yapıların dünü, bugünü ve yarını. Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(1), 109-118.
- Çobancoğlu T. (2003) Türkiye'de geleneksel ahşap ev yapı sistemlerinin irdelenerek gruplandırılmasına yönelik bir değerlendirme, Tasarım+ Kuram, 2(3), 27-42.
- Hanedar, B. (2021). İç Mekânda Ahşap Malzeme Kullanımı ve Örnekler Üzerinden İncelenmesi (Master's thesis, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).

- Kaba, H. (2002). İstanbul Kemerburgaz ve Kurtkemer Civarında Kesilmiş Odun Materyalinde Gelişen Mantar Florası Üzerine Araştırmalar (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- Kara M. A. (2017) Ahşap yapı elemanlarının tahribatsız hasar tespit yöntemleriyle incelenmesi, Danışman: Karagüler M.E., Y.L. Tezi, İTÜ Fen Bil Enst, Mimarlık ABD, 201s.
- Kaz, S. (2022). Bazı ağaç türlerine ait reaksiyon odunlarının anatomik, kimyasal, optik ve lif morfolojileri açısından karşılaştırılması (Doctoral dissertation, Kastamonu Üniversitesi).
- Koç V. (2016) Depreme maruz kalmış yığma ve kırsal yapı davranışlarının incelenerek yığma yapı yapımında dikkat edilmesi gereken kuralların derlenmesi. Çanakkale onsekiz mart üniversitesi fen bilimleri enstitüsü dergisi, 2(1), 36-57.
- Koç, V. (2021) Yapı Malzemesi Teknolojileri Bağlamında Ahşabın İncelenmesi, Yücebaş C. (Der.), Mhendislikte konstrüksiyon imalat ve malzeme üzerine güncel araştırmalar içinde (ss. 57- 90), Ankara: İksad.
- Mısırlı A. (2022) Zonguldak Çaycuma’da Çantı Tekniğinde İnşa Edilmiş Bir Cami: Akçahatipler Köyü Cami, TÜBA-KED Türkiye Bilimler Akademisi Kültür Envanteri Dergisi, (26), 55-70.1
- Muratoğlu A. (2011) Restorasyonda ahşap yapı elemanlarının karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) ile güçlendirilmesi, Y.L. Tezi, Danışman: Uysal B., Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya ve Dekorasyon Eğitimi Ana Bilim Dalı, 97 s.
- Okka, M. (2020) Ahşap kiriş elemanlarının deneysel olarak dayanımlarının belirlenmesi, Y.Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Türkiye
- Orhan, F., Zaman, S., & Çavuş, A. (2019). Artvin İlindeki Geleneksel Kırsal Mesken Mimarisine Bir Örnek: Ahşap Yığma Evler, 1. İstanbul Uluslar arası Coğrafya Kongresi, 420- 430.
- Özköse D.S. (2014) Ahşap yapı restorasyonunda uygulama sorunları ve çözüm önerileri, Y.L. Tezi, Danışman: Söğütlü C., Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya ve Dekorasyon Eğitimi Ana Bilim Dalı, 63 s.
- Perker Z.S. (2012) Sistem yaklaşımı bağlamında bir girdi ve sistem olarak geleneksel anadolu konutu, e-Journal of New World Sciences Academy NW-SA-Engineering Sciences, 1A0325, 7, (2), s. 554-571.
- Polat H. (2016) Bursa kent kimliğinin bina cepheleri ve çatılar üzerinden incelenmesi, Y.L. Tezi, Danışman: Taş M., Uludağ Üniv. Fen Bil. Enst. Mimarlık ABD, 237 s.
- Şirin, G., & Aydemir, D. (2016). Sonlu Elemanlar Metodunun Ahşap Malzemelerde Kullanımına İlişkin Bir Araştırma. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 18(2), 205-212.

- Tuna C., Orta Karadeniz Bölgesi Sahil Kesiminde Geleneksel Mimari, Arkeoloji ve Sanat Yayınları, İstanbul, 132 s., 2008.
- Var, A. A. (2001). Ahşap malzemede su alımının parafin vaks/bezir yağı karışımıyla azaltılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi Seri: A, (2), 97-110.
- Yaman, F. Z. (2007). Geleneksel Ahşap Yapılarda Kullanılan Ahşap Yapı Elemanlarının Uzun Dönem Performansı–Giresun Zeytinlik Mahallesiinde Örnek Yapı İncelemesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

BÖLÜM 3

GRANİT PLAKALARININ EVİRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI*

M. Fatih ZİYALİ¹

Nesibe YALÇIN²

Sibel ÜNALDI³

*(4th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences – 10-13 Nov 2022)

1 Öğrenci; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü. fatihziyali@gmail.com

2 Dr. Öğr. Üyesi; Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. nesibeyalcin@erciyes.edu.tr ORCID No: 0000-0003-0324-9111

3 Dr. Öğr. Üyesi; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü. sibel.unaldi@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9948-4284

GİRİŞ

Doğal taşlar, tarih boyunca hem güzelliği hem de dayanıklılığı sebebi ile yapılarda tercih edilmiştir. Kullanım alanı zamanla genişleyen doğal taşlar, günümüzde özellikle inşaat, heykelticilik, kaplama, döşeme, optik sanayi, cam sanayi, mezar taşı, süs eşyası, porselen ve mıcır yapımında kullanılmaktadır (İGM, 2021). Artan talebi karşılamak için doğal taş üreticileri, üretim verimliliğini de ön plana alarak kapasite artırımına gitmektedir (Öktem vd., 2021).

Ülkemizde çoğu firma/işletmede mermer ve granit gibi doğal taşların sınıflandırma işlemi, işçiler tarafından çıplak gözle ve el yordamıyla (manuel) yapılmaktadır. Ancak bu sınıflandırma şekli, yoğun dikkat ve insan gücü gerektirmekte ve bu durum insan kaynaklı hatalardan dolayı üretim hızı ve verimini düşürmektedir. Ayrıca özellikle kalitelere göre sınıflandırmada, hatalı tespitler sınıflandırma doğruluğunu olumsuz yönde etkilenmektedir. Hatalı sınıflandırma, üretici firmanın alıcı firmaya istenilen kalite sınıfından farklı bir ürünün gönderilmesine neden olmaktadır. Yanlış gönderilen ürünlerin değişim süreci, üreticiye zaman kaybının yanı sıra lojistik için ek maliyet de getirmektedir.

Üretim verimliliğini etkileyen hatalı sınıflandırma problemine çözüm olarak literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir. Elmas çalışmasında (2022), Evrişimli Sinir Ağları ile mermer ve granit çeşitlerini transfer öğrenme yöntemiyle sınıflandırmıştır. Sınıflandırma sonucunda ResNet-50 ağı ile %97,4 sınıflandırma başarısı sağlanmıştır. Granit sınıflandırmanın gerçekleştirildiği bir başka çalışmada (Ferreira ve Giraldo, 2017), Evrişimli Sinir Ağları yaklaşımları incelenmiş ve %85 üzerinde doğruluk oranı elde edilmiştir. Singh ve SinghSaini tarafından (2018) çok küçük granit plakalarının sınıflandırılması için bir Evrişimli Sinir Ağı mimarisi önerilmiştir. Önerilen model ile farklı boyut ve görüntü çözünürlüklerindeki granit plakalarının %90' ın üzerinde doğruluk ile sınıflandırılması sağlanmıştır. Bir derin öğrenme yaklaşımı olan Evrişimli Sinir Ağları ile granit karolarının sınıflandırıldığı bir çalışmada (Ather vd., 2019) AlexNet ve VGGNet kullanılmış ve %99,3 sınıflandırılma doğruluğu elde edilmiştir. Öktem ve diğerleri (2021) tarafından 5 farklı mermer türüne ilişkin sınıflandırma için derin öğrenme ve transfer öğrenme tabanlı bir mimari önerilmiş ve %96,07 doğruluk ile mermer sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Levha mermer resimleri ele alınan çalışmada (Karaali ve Eminağaoğlu, 2020), 6 farklı kalite tipine göre sınıflandırma yapan bir derin öğrenme modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile ortalama %92,2 doğruluk elde edilmiştir. Martinez-Alajarin ve diğerleri (2005) ise mermer dokusunun kalite bazlı sınıflandırılması için otomatik bir sistem önermiştir. Mermer plakalarının kalitesine göre farklı gruplara ayrılması için geri yayılım algoritması ile eğitilmiş çok katmanlı bir algılayıcı sinir

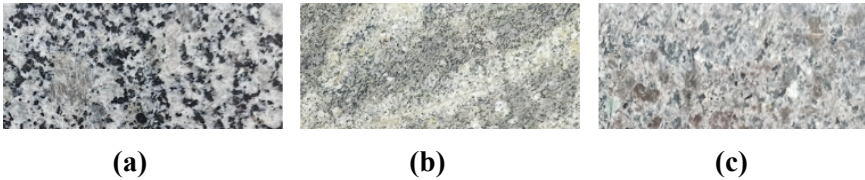
ağı kullanılmış ve %98,9 başarılı sınıflandırma oranı elde edilmiştir. Ardalı (2008), görüntü işleme ve yapay sinir ağları yöntemleri kullanılarak mermer bloklarının otomatik sınıflandırması üzerine çalışmıştır. Pençe ve Şişeci Çeşmeli (2019), mermerlerin sınıflandırmasını derin öğrenme yöntemi ile başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir. Traverten plakalarının sınıflandırılması amaçlı çalışmada (Metlek vd. 2015), Bayes Sınıflayıcı ve Uyarlamalı Sinir Bulanık Sınıflayıcı yöntemleri kullanılmış ve tasarlanan bir otomasyon sisteminin üzerinde yürütülmüştür. Çalışma sonucunda ortalama %94 doğruluk oranı ile bir sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Taşları sınıflandırmak için otomatik bir tanıma sisteminin önerildiği çalışmada (Tropea vd., 2022), Evrişimli Sinir Ağları ve makineli öğrenme tabanlı hibrit bir yaklaşım uygulanmıştır. Parametre sayısı ve çıkarım süresi açısından en iyi sonuçlar Evrişimli Sinir Ağları tarafından elde edilmiştir. Ran ve diğerleri (2019) tarafından 6 yaygın kaya türünün (granit, kireçtaşı, çakıltı, kumtaşı, şeyl, milonit) sınıflandırılması için derin Evrişimli Sinir Ağları modeli önerilmiş ve çalışma sonucunda %97,96 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir.

Bu çalışmada, granit plakaların üretim süreci göz önünde bulundurularak üretim verimliliği ve kalitesini artırma için granit sınıflandırma işlemi ele alınmıştır. Granit sınıflandırmanın yüksek doğruluk ile gerçekleştirilmesi amacıyla Evrişimli Sinir Ağları tabanlı modeller önerilmiştir. Önerilen modeller ile %96 üzerinde doğru sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

A. *Veri Seti*

Evrişimli Sinir Ağlarının eğitiminde kapsamında kullanılacak veri seti, GraniTaş Granit Sanayi ve Pazarlama A.Ş. firmasında bulunan granit plakalarının görüntülerinden hazırlanmıştır. Veri setinde, Şekil 1’de birer adet örneği verilen Ankara Füme, Balaban ve Giresun Vizon olmak üzere üç farklı granit türüne ilişkin toplamda 216 adet görüntü bulunmaktadır.



Şekil 1: Granit türleri (a) Ankara Füme, (b) Balaban ve (c) Giresun Vizon

Veri seti üzerinde ön işleme yapılmış, sentetik veri üretme yöntemleri ile veri setinin boyutu artırılmıştır. Veri üretiminde Keras içinde bulunan Data Generator fonksiyonu kullanılmış ve granit görüntülerine eğitim kalitesini en az seviyede etkileyecek işlemler uygulanmıştır. Yatayda simetri, dikeyde simetri, 40 derecelik döndürme (rotasyon), yakınlaştırma, kaydırma ve kırpma işlemleri uygulanmış ve üç sınıfa ait toplamda 457 adet görüntü elde edilmiştir. Görüntülere ilişkin dağılım Tablo 1’de verilmiştir.

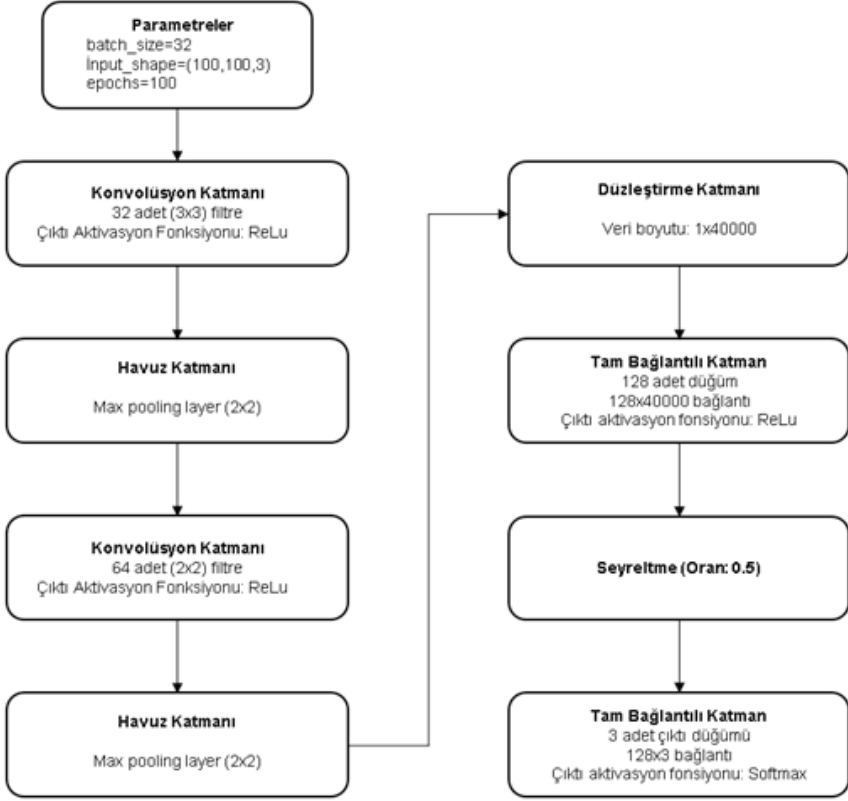
Tablo 1: *Veri Seti Dağılımı*

Granit Türü	Ön İşleme Öncesi (Adet)	Ön İşleme Sonrası (Adet)
Ankara Füme	59	160
Balaban	78	138
Giresun	79	159
Vizon		
Toplam	216	457

Veri setinin %70’i eğitim verisi (train data) ve %30’u test verisi (test data) olarak ayrılmıştır. Ayrıca eğitim verisinin %10’u doğrulama (validation) amaçlı kullanılmıştır.

B. Evrişimli Sinir Ağları

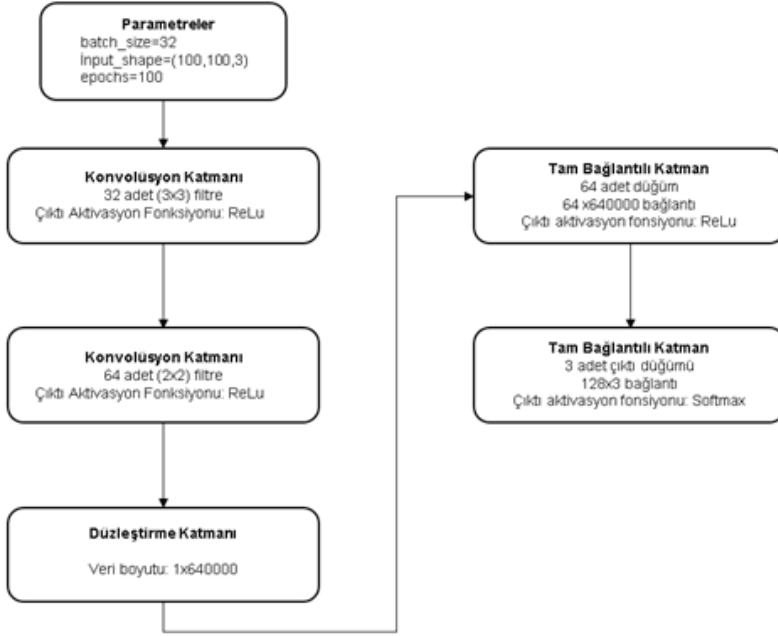
Evrişimli Sinir Ağları, bir derin öğrenme yöntemidir. İnsanın algısına yakın sınıflandırma başarısı nedeniyle, günümüzde nesne tespit etme, nesne takip etme, görüntü sınıflandırma ve doğal dil işleme gibi birçok problemin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Evrişimli Sinir Ağları mimarisi genel olarak konvolüsyon (convolution, evrişim), havuz (pooling, havuzlama) ve tam bağlantılı (dense, fully-connected) katmanlarından oluşmaktadır. Bu çalışmada, birçok farklı Evrişimli Sinir Ağı modeli ve farklı hiper parametreler kullanılarak deneyler yapılmış ve en başarılı sonuçları veren iki modelin mimari tasarımı Şekil 2 ve Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 2: Birinci modelin mimarisi

Modellerde giriş verisi boyutu (100,100,3), devir sayısı (epoch) 100 ve yığın değeri (batch size) ise 32 olarak ayarlanmıştır. Birinci modelde iki adet konvolüsyon katmanı bulunmakta, ilk konvolüsyon katmanında 32 adet 3x3' lük ve bir sonraki konvolüsyon katmanında 64 adet 2x2' lik filtre kullanılmıştır. İki konvolüsyon katmanı için de çıktı aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU (Rectified Linear Unit - Doğrultulmuş Lineer Birim) tercih edilmiştir. Her bir konvolüsyon katmanının ardından birer tane havuz katmanı kullanılmıştır. Havuz katmanlarında 2x2 boyutunda maksimum havuzlama (max pooling) yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra düzleştirme katmanı kullanılarak verilerin tek boyutlu bir hale getirilmesini sağlanmıştır. Bu aşamada elde edilen 40.000 elemanlı bir boyutlu dizi, bir sonraki katmanın giriş elemanı kullanılmıştır. Düzleştirme (flatten) katmanının hemen ardından tam bağlantılı (dense) katmanlar yerleştirilmiştir. İlk yerleştirilen tam bağlantılı katman 128 adet düğümden oluşan ve ReLU çıktı aktivasyon fonksiyonu kullanan bir gizli katmandır. İlk tam bağlantılı katmanın ardından seyreltme oranı 0,5 olan bir sey-

reltme katmanı eklenmiştir. Son olarak 3 adet çıktı düğümüne sahip ve çıktı aktivasyon fonksiyonu Softmax olarak ayarlanmış bir çıkış katmanı oluşturulmuştur.



Şekil 3: İkinci modelin mimarisini

İkinci geliştirilen model iki konvolüsyon, bir düzeleştirme ve iki tam bağlantılı katmandan meydana gelmektedir. İkinci modelin ilk modelden en büyük farkı, havuz katmanlarının ve seyreltme katmanının bulunmamasıdır. İlk konvolüsyon katmanı 32 adet 3×3 boyutunda ve ikinci konvolüsyon katmanı 64 adet 2×2 boyutunda filtreye sahiptir. Katmanlara, çıktı aktivasyon fonksiyonu olarak ReLu kullanılmıştır. Devamında yer alan 640.000 elemanlı bir boyutlu düzeleştirme katmanı, ilk tam bağlantılı katman için giriş katmanı görevi görmektedir. Birinci tam bağlantılı katmanda 64 adet düğüm ve ikinci tam bağlantılı katmanda 3 adet çıktı düğümü bulunmaktadır. Tam bağlantılı katmanların birincisinde ReLu aktivasyon fonksiyonu, ikincisinde ise Softmax aktivasyon fonksiyonu tercih edilmiştir. Her iki modelde, optimizasyon algoritması olarak Adam algoritması tercih edilmiş ve öğrenme oranı ise 0,001 olarak belirlenmiştir. Kayıp fonksiyonu, kategorik çapraz entropi seçilmiştir. Oluşturulan modellerin özeti sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2: Birinci modelin özeti

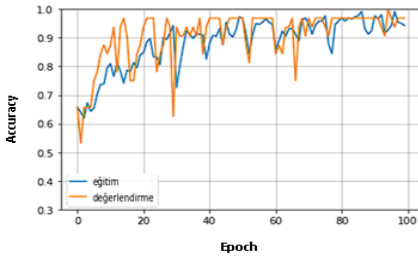
Katman	Çıktı	Parametre
conv2d_2 (Conv2D)	(None, 100, 100, 32)	896
max_pooling2d_2 (MaxPooling2D)	(None, 50, 50, 32)	0
conv2d_3 (Conv2D)	(None, 50, 50, 64)	8256
max_pooling2d_3 (MaxPooling2D)	(None, 25, 25, 64)	0
flatten_1 (Flatten)	(None, 40000)	0
dense_2 (Dense)	(None, 128)	5120128
dropout_1 (Dropout)	(None, 128)	0
dense_3 (Dense)	(None, 3)	387

Tablo 3: İkinci modelin özeti

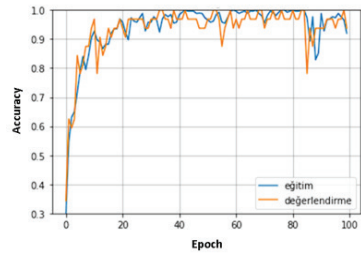
Katman	Çıktı	Parametre
conv2d (Conv2D)	(None, 100, 100, 32)	896
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 100, 100, 64)	8256
flatten (Flatten)	(None, 640000)	0
dense (Dense)	(None, 64)	40960064
dense_1 (Dense)	(None, 3)	195

BULGULAR VE TARTIŞMA

Evrişimli Sinir Ağları tabanlı modellerin eğitim süreci, 100 epoch'ta durdurulmuştur. Eğitim ve doğrulama işlemleri sonucunda modellere ilişkin elde edilen doğruluk ve kayıp grafikleri sırasıyla Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir.

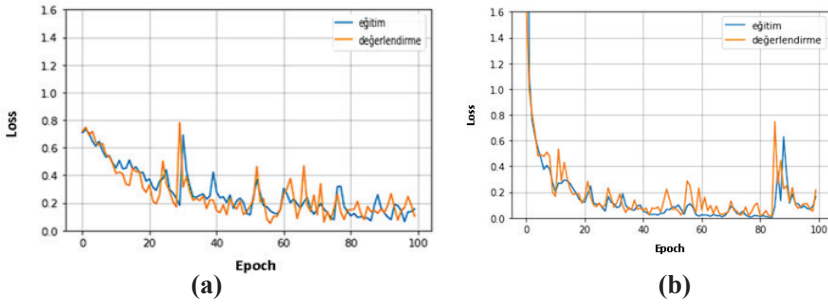


(a)



(b)

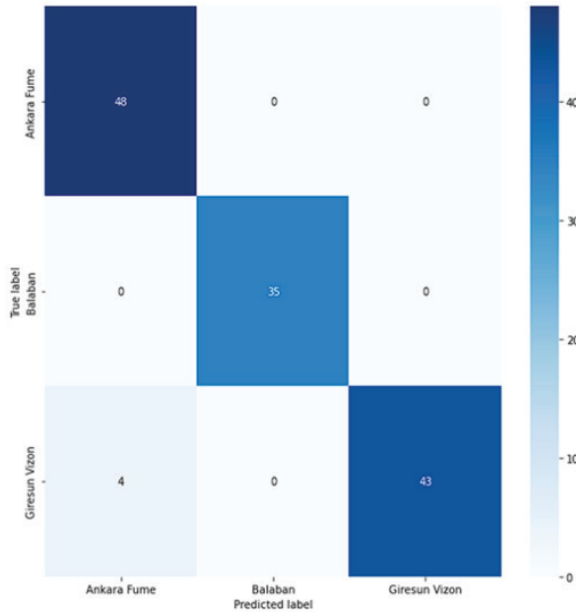
Şekil 4: Doğruluk grafiği (a) Birinci model ve (b) ikinci model



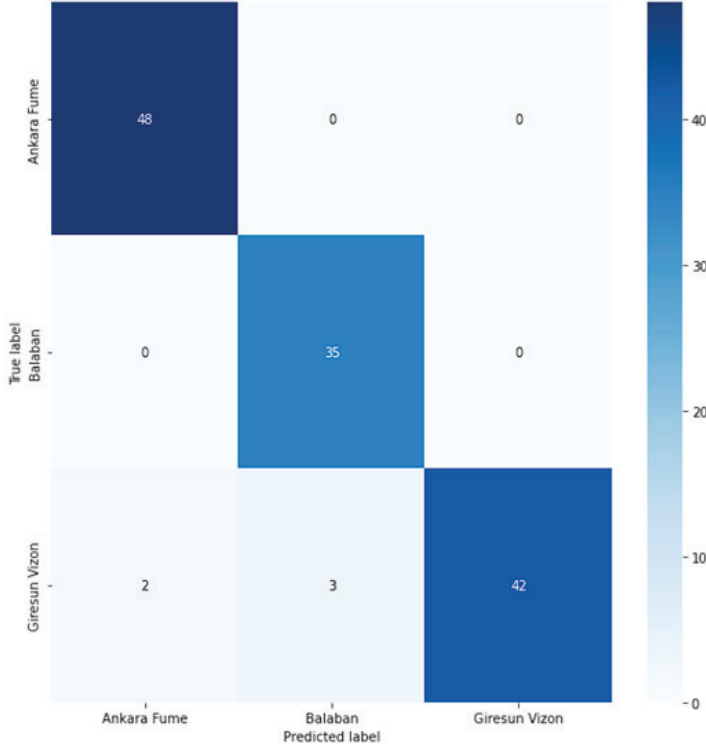
Şekil 5: Kayıp grafiği (a) Birinci model ve (b) ikinci model

Eğitim ve doğrulamaya ilişkin modellerin doğruluk ve kayıp eğrilerinin birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. İkinci modelin, birinci modele kıyasla daha iyi genelleştiği/öğrendiği söylenebilir. Ayrıca ikinci modelin doğrulama doğruluğu eğrisinde 80 epochtan sonra düşme görülmüştür. İkinci modelin eğitimi, 80 epochta durdurularak daha yüksek bir başarımla elde edilebilir. Eğitim sonucunda birinci modelin doğruluk değeri %98,98 ve ikinci modelinki ise %97,97 olarak hesaplanmıştır.

Test işleminde, 48 adet Ankara Fume, 35 adet Balaban ve 47 adet Giresun Vizon olmak üzere toplamda 130 adet granit görseli kullanılmıştır. Ayrıca test işlemi için kullanılan granit görselleri arasında veri çoğaltma işlemi görmüş herhangi bir görsel bulunmamaktadır.



Şekil 6: Birinci modelin testine ait karışıklık matrisi



Şekil 7: İkinci modelin testine ait karışıklık matrisi

Şekil 6 ve Şekil 7’de modellerin testi sonrasında elde edilen karışıklık matrisleri verilmiştir. Karışıklık matrisleri incelendiğinde Ankara Füme ve Balaban için kullanılan görsellerin tamamının doğru sınıflandırıldığı gözlemlenmiştir. Birinci model, 47 adet Giresun Vizon görselinin 43 adetini doğru, 4 adetini ise hatalı (Ankara Füme) şekilde sınıflandırmıştır. İkinci model ise Giresun Vizon görsellerinin 42 adetini doğru 5 adetini ise hatalı (2 adet Ankara Füme ve 3 adet Balaban) şekilde etiketlendirilmiştir.

Modellerin başarımlarının karşılaştırılmasında ayrıca duyarlılık (recall), kesinlik (precision) ve F1-ölçütü değerleri kullanılmıştır. Modellere ilişkin elde edilen değerler Tablo 4’te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ankara Füme ve Balaban granit türleri, her iki model tarafından 1,0 kesinlik değeri ile doğru sınıflandırılmıştır. Her iki model tarafından Giresun Vizon için duyarlılık değeri 1,0 olarak hesaplanmıştır. Modeller tarafından hatalı sınıflandırılan bütün görseller, Giresun Vizon granit türüne aittir. Ankara Füme için en iyi sonuçlar ikinci model, Balaban ve Giresun Vizon için birinci model tarafından elde edilmiştir. Birinci modelin test doğruluğu %96,92 iken ikinci modelinki ise %96,15’ tir.

Tablo 4: *Modellerin performans karşılaştırması*

Model	Metrik	Granit Türü		
		Ankara Füme	Balaban	Giresun Vizon
Birinci Model	Duyarlılık	0,92	1,00	1,00
	Kesinlik	1,00	1,00	0,91
	F1 Ölçütü	0,96	1,00	0,96
İkinci Model	Duyarlılık	0,96	0,92	1,00
	Kesinlik	1,00	1,00	0,89
	F1 Ölçütü	0,98	0,96	0,94

SONUÇ

Çalışma kapsamında, Evrişimli Sinir Ağları tabanlı modeller geliştirilmiş ve granit türlerinin sınıflandırılması için önerilmiştir. Modellerin eğitimi sonucunda, birinci model ile %98,98 ikinci model ile %97,97 doğruluk; testleri sonucunda ise birinci model ile %96,92 ve ikinci model ile %96,15 doğru sınıflandırma oranı elde edilmiştir. Birinci model, ikinci modele kıyasla daha yüksek başarımlar elde ettiği görülmektedir. Her iki model, Ankara Füme ve Balaban granit türlerini doğru sınıflandırmıştır ve her iki modelin Giresun Vizon sınıflandırma duyarlılığı yüksektir. En iyi sonuçlar, Balaban sınıflandırmasına aittir ve birinci model ile elde edilmiştir.

Bu çalışmada önerilen iki sınıflandırma modeli, geleneksel granit üretim sürecindeki insan müdahalesini minimize edebilecek ve doğru granit sınıflandırmayı hızlı ve etkin bir şekilde otomatik yapabilecek bir sisteme entegre edilebilir. Ayrıca akıllı telefonlar ile granit türü tespiti için uygulama geliştirilmesinde kullanılabilir.

Gelecek çalışmada, daha fazla granit görselinin elde edilmesi ile veri seti boyutunun artırılması planlanmaktadır. Böylece veri çoğaltma yöntemlerine gerek kalmayacak, eğitim ve doğrulama için tamamen farklı iki veri seti kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar; bu çalışmada kullanılan veri setinin hazırlanmasına katkı sağlayan GraniTaş Granit Sanayi ve Pazarlama A.Ş.'ye ve 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 1919B012114479 başvuru numaralı proje ile bu çalışmayı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

REFERANSLAR

- Ardalı, E. (2008). Classification of marble textures using neural networks and image processing methods (Doctoral dissertation, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Ather, M., Khan, B., Wang, Z., & Song, G. (2019, October). Automatic recognition and classification of granite tiles using convolutional neural networks (CNN). *In Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Advances in Artificial Intelligence* (pp. 193-197).
- Elmas, B. (2022). Classification varieties of marble and granite by convolutional neural networks with transfer learning method. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(2), 985-1001.
- Ferreira, A., & Giraldi, G. (2017). Convolutional Neural Network approaches to granite tiles classification. *Expert Systems with Applications*, 84, 1-11.
- İGM (İhracat Genel Müdürlüğü) Maden, Metal ve Orman Ürünleri Dairesi. (2021). Doğal Taşlar Sektör Raporu. Ankara: Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı.
- Karaali, İ., & Eminağaoğlu, M. (2021). Mermer işlemede kalite sınıflandırması için evrişimsel sinir ağı modeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(1), 347-358.
- Martínez-Alajarín, J., Luis-Delgado, J. D., & Tomás-Balibrea, L. M. (2005). Automatic system for quality-based classification of marble textures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 35(4), 488-497.
- Metlek, S., Cetişli, B., & Şenel, A. F. (2015, May). Classification of travertine plates with image processing. *In 2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1497-1500).
- Öktem, M., Akosman, Ş. A., Moral, Ö. T., & Kılıç, V. (2021). Derin Öğrenme Tabanlı Mermer Yüzeylerinin Otomatik Sınıflandırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (26), 73-77.
- Ran, X., Xue, L., Zhang, Y., Liu, Z., Sang, X., & He, J. (2019). Rock classification from field image patches analyzed using a deep convolutional neural network. *Mathematics*, 7(8), 755.
- Pençe, İ., & Çeşmeli, M. Ş. (2019). Deep learning in marble slabs classification. *Scientific Journal of Mehmet Akif Ersoy University*, 2(1), 21-26.
- Singh, N., & SinghSaini, B. (2018, October). An Improved Convolutional Neural Network for Classification of Small Patches of Granite Tiles. *In 2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)* (pp. 1125-1130). IEEE.
- Tropea, M., Fedele, G., De Luca, R., Miriello, D., & De Rango, F. (2022). Automatic Stones Classification through a CNN-Based Approach. *Sensors*, 22(16), 6292.

“

BÖLÜM 4

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE AERODİNAMİK ANALİZLERİ

V. Tuna ŞABA¹

Can COSKUN²

Zuhal OKTAY³

”

1 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, tunasaba93@gmail.com,

2217104011@std.idu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5753-1521>

2 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, dr.can.coskun@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0003-4100-0296>

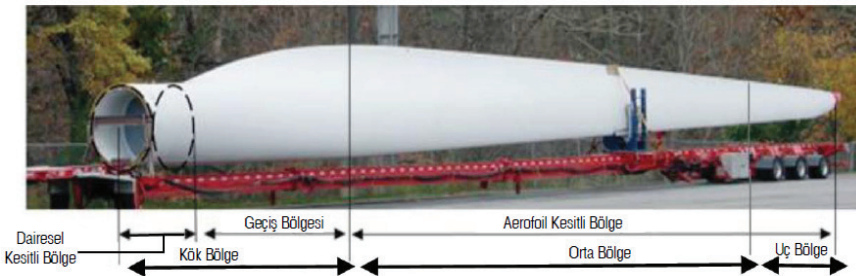
3 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, zuhal.oktay@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0001-6167-7048>

1.GİRİŞ

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı önem kazanmaktadır. Fosil yakıtların azalıyor olması insanları, farklı enerji kaynakları arayışına itmektedir. Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Rüzgar enerjisi, yeni çağ dönemlerinden itibaren günümüze kadar farklı teknolojilerle kullanılagelmıştır. Bu enerji kaynağı geçmişte ilk kullanımı yel değirmenleri olarak bilinmektedir. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte yel değirmenleri yerini rüzgar enerji türbinlerine bırakmıştır. Rüzgar enerjisinde kullanılan rüzgar türbinleri elektrik üretimi için tercih edilir. Rüzgar türbinlerinin üretimi için belli etkenler bulunmaktadır. Bu etkenlerden önemli olanlardan biri de rüzgar türbinlerinin aerodinamik analizleridir. Bu çalışmada rüzgar türbinlerinin aerodinamik analizleri ile ilgili çalışmaların incelemesi yapılmıştır. Sonuç olarak rüzgar türbinlerinin aerodinamik analizleri, türbinlerden daha iyi performans alabilmek için önemli etkenler olduğu düşünülmektedir.

Kaya ve ark., (Kaya ve ark., 2015) rüzgar türbinlerindeki kanatlar, rüzgardaki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye çevirerek şafta iletmektedirler. Kanatlar, kök bölge, orta bölge ve uç bölge olmak üzere üç bölgeye ayrılmaktadır. Bu üç bölge aerodinamik ve yapısal fonksiyonuna göre değişkenlik gösterebilir. Kanadın en fazla zorlanmaya maruz kalan kök bölgesi, kanat bağlantı noktası ile kanadın profil şeklini aldığı kısım arasında kalan bölgeden oluşmaktadır. Bu bölge dairesel kesit alanına sahiptir. Kanadın tasarımı aerodinamik parametreler göz önünde bulunan kanat orta bölgesi, güç üretiminde en önemli bölge olmaktadır. Güç üretiminde kritik bölgeye sahip diğer bölge ise kanat uç bölgesidir. Bu bölge kanadın narin tasarımına sahip olmaktadır.



Şekil 1. Örnek bir rüzgar türbin kanadının görseli ve genel yapısı (Kaya ve ark., 2015)

Çolak ve ark., (Çolak ve ark., 2018) rüzgar, güvenilir, yakıttan bağımsız olan ve hızlı devreye alınabilme gibi avantajları olmakla birlikte kullanım alanlarını giderek arttırmaktadır. Günümüzde türbin teknolojinin gelişmesi, rüzgar enerjisine olan talebe önemli ölçüde katkısı bu-

lunmaktadır. Kompozit malzemelerdeki yeni gelişmelere paralel olarak aerodinamik ve mekanik yapılarının hızla gelişmesi, gürültü ve manyetik kirlilik problemlerinin en aza indirilmesi yüksek güçlü türbinlerin devreye girmesine olanak sağlamıştır. Böylece rüzgar türbinlerinin elektrik üretiminde önemini arttırmaktadır.

Aerodinamik, hareket eden katı kütlelerin havayla etkileşimlerini inceleyen bilim dalıdır. Havanın parçalı olarak katı bir cisim ile irtibata geçmiş olması, havanın hareketi ve uçağın kanadı gibi, buna örnek olarak gösterilebilir. Aerodinamik analizlerin kullanım alanları; uçak, otomotiv, gemi tasarımları şeklinde sıralanabilir. Ayrıca rüzgar türbinleri için aerodinamik analizlerin önemi artmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Liu ve ark (Liu ve ark., 2014) tarafından Deterministik(kararsız) olmayan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları kullanılarak yatay eksenli rüzgar türbini kanatlarının stokastik performans değerlendirilmesi ile ilgili çalışma yapılmıştır. Bu makale, NREL S809 kanat profili ve NREL Faz VI türbin kanatlarının NIPRC yöntemini uygulamıştır. Giriş sınırına uygulanan hücum açısı ve rüzgar hızının sırasıyla Gauss dağılımında belirsiz parametreler olduğu varsayılmaktadır. Çalışma sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Müdahaleci olmayan olasılıksal eşdiziminin, Monte Carlo yöntemiyle karşılaştırıldığında, belirsizlik ölçümü için verimli bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Kanat profilinin ön kenarı etrafındaki akış, hücum açısının belirsizliğine karşı daha hassastır.

Giriş hızının girdi belirsizliğinin bir rüzgar türbininin aerodinamik performansı üzerinde büyük etkisi gösterilmektedir.

C_p 'nin maksimum değişimi, düşük rüzgar hızlarında emme tarafının ön kenarında meydana gelir ve bu hız arttıkça ve akış ayrımı görüldüğünde, maksimum değişiklik arka kenara kadar uzanır.

Ashrafi ve ark (Ashrafi ve ark., 2015) Bu çalışmada, değişen rüzgar hızının yatay eksenli bir rüzgar türbininin tasarım parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, kanat elemanı momentum teorisine dayalı sayısal yinelemeli bir algoritma geliştirilmesiyle birlikte sabit dönme hızına sahip kanat tasarımı belirlenmiştir. Sayısal model, farklı çalışma koşulları için en uygun hatve açısı (pervane açısı) düzeltmelerini bularak kanadın tasarım dışı performansını iyileştirmek üzere genişletildi. Tasarım dışı koşullarda rüzgar türbini performansını iyileştirmek için, hatve açısına uygulanması gereken doğrusal olmayan bir fonksiyon

belirlenmiştir. Bu makalenin kritik sorunlarından bazıları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Hem tasarım hem de tasarım dışı koşullara karşılık gelen tasarım parametrelerini elde etmek için genişletilebilmesi için bir gelişmiş BEM yöntemine başvurulmuştur.

Yüksek rüzgar hızlarında eksenel indüksiyon faktörü sıfıra yaklaşırken, düşük rüzgar hızlarında artarak 1'e yaklaşır. Ek olarak, açısız indüksiyon faktörü, rüzgar hızı değişimleri ile önemli bir değişiklik yoktur.

Yüksek rüzgar hızlarında, kanadın çoğu durur ve güç katsayısı düşer. Kanat bölümlerinin yaklaşık yarısı durduğu zamanda maksimum güç katsayısına ulaşılabilir.

(Liu ve ark., 2013) Bu çalışmada, daha sonra, diferansiyel dinamik durak doğrusal olmayan ONERA modeline dayalı eğilme-bükme-büküm rüzgar türbini kanadının doğrusal aeroelastik stabilite analizi incelenmiştir. Sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Farklı yapılar ve parametreler için çevrimiçi olmayan aeroelastisitenin etkileri rüzgar hızı, ön büküm ve kompozit ince duvarlı bıçağın katlama açısı, eğilme-bükülme temel alınarak incelenir. Kararlılık analiz yöntemleri ve çözüm metodolojisi açıklanmaktadır ve tartışılmaktadır.

Kararlılığın, zaman alıcı bir süreç içerisinde ortaya konulmakla birlikte doğrusal olmayan zaman ile doğru bir şekilde tespit edilmiştir. Bundan dolayı, özdeğer analizinin doğrulanmasıyla doğrusallaştırılmış zaman tepkisi önerilmektedir.

Lui ve ark. (Lui ve ark., 2020) tarafından yapılan çalışmada bir NACA 4415 kanat profili etrafındaki 2B akış, giriş $Re_c = 2 \cdot 10^5$ ve hücum açısı $AOA = 10^\circ$ temelinde Reynolds sayısında üç denklemlilik k- κ - ω türbülans modeli ile simüle edildi. Model, literatürdeki deneysel verilerle doğru olduğu tespit edilmiştir. Emme yüzeyinde oluşan ve kararsız girdap dökülmesine neden olan laminer ayırma kabarcıklarını ortadan kaldırmak için yüzey olukları önerilmiştir. Girinti derinliği, en boy oranı, çapraz profil ve oluk konumu gibi oluk özelliklerinin aerodinamik performans üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik bir simülasyon yapıldı. Sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Kanat profili performansını etkileyen kilit faktör, girinti derinliğinin temel sınır tabaka kalınlığına oranı bulunmaktadır. En etkili girinti derinliği oranı 1.0 ile 1.5 arasında görülmektedir. Oluk en boy oranının etkisi, girinti derinliğine bağlı olduğu görülmektedir. Daha küçük bir en-boy oranı (daha geniş oluk), 1.2'den daha düşük bir girinti derinliği oranı için girdabın daha iyi yakalanmasını sağlayabilir; ancak oluk derinse vortek-

si(girdap) stabilize etmek için daha yüksek bir en-boy oranı (dar oluk) gereklidir. Bir ark oluğu ile karşılaştırıldığında, özellikle 1.2–1.5 girinti derinliği oranı için dikdörtgen bir çapraz profil, oluk içindeki sıvı hareketini daha iyi sınırlar, girdap stabilitesini artırır ve duvar sürtünmesini azaltır. Oluk uç noktasını yukarı veya aşağı yönde hareket ettirilmesi durumunda, oluk içindeki potansiyel girdap boyutunu etkilemektedir. Ayrıca sırasıyla girinti derinliği oranını alçaltma veya yükseltme etkisi üretilmektedir. Dikdörtgen bir oluk için belirlenebilecek uç nokta, 0.15'lik bir en-boy oranı olan giriş uzunluğunun 0.16 katı olmaktadır. AOA=10° tasarımı aerodinamik kaldırma-sürüklenme oranını yaklaşık %50 artıran optimum parametrelere sahip kanat profili yüzey olukları, küçük rüzgar türbinlerinin güç katsayısını %2 artırır.

Arunvinthan ve ark. (Arunvinthan ve ark., 2020) çalışmalarında, temel düz ön uç modeli ve modifiye edilmiş küçük, orta ve yüksek öncü çıkıntılar kanat konfigürasyonları üzerine etki eden aerodinamik kuvvetler, MPS4264 Scanivalve eş zamanlı basınç tarayıcısı kullanılarak kanat üzerinde farklı türbülans yoğunluklarında yapılan yüzey basıncı ölçümlerinden elde edilmiştir. Sonuçlar aşağıdaki şekilde çıkarılmıştır:

Çeşitli şekillerde modifiye edilmiş ön kenar çıkıntılı kanat konfigürasyonunun üçünün de aerodinamik kaldırma özellikleri, hücum açılarının hem artan hem de azalan yönünde türbülans yoğunluğu ve hücum açılarındaki (α) artışla birlikte artma eğilimindedir.

Türbülansa sahip tüm öncü çıkıntılar (LEP) kanat konfigürasyonu için zaman ortalamalı sürüklenme katsayısı (CD), TI = %0,51'lik bir serbest akış türbülans yoğunluğuna maruz kalan temel öncü çıkıntılar kanadınınkinden daha yüksektir.

Maksimum kaldırma katsayısını (CL) yükseltme durumunda olan, ön kenar çıkıntılarının genişliğindeki yükseliş, yumuşak durma özellikleriyle birlikte, yüksek öncü çıkıntılar yapılandırılmasını CL açısından daha faydalı hale getirmektedir.

Jin ve ark. (Jin ve ark., 2018) çalışmasında, ters yönde dönen iki düz kanatlı dikey eksenli rüzgar türbini üzerinde bir yukarı akış deflektörü üzerinde 3B HAD simülasyonları yürütülmüştür. Bu çalışmadaki amaç, dikey eksenli rüzgar türbinlerinin (VAWT'ler) performansı üzerindeki memba deflektörünün parametre etkisini göstermektedir. Bu amaçla en iyi ve kaliteli meshin belirlenmesi için HAD modelleme ve türbülans modeli çalışmaları araştırılmıştır. Simülasyon sonuçları (deflektörsüz ve deflektörlü), iyi bir uyum gösteren deneysel verilerle karşılaştırılmıştır (maksimum hata %10,12'dir). Doğrulanmış modele dayalı olarak, Dikey eksen rüzgar türbinlerinin çıkış gücü üzerindeki memba deflektörünün etkisi parametresi incelenmiştir. Saptırıcının, dikey eksenli rüzgar türbinlerinin

verimliliğini önemli ölçüde artırırken negatif torkları azaltabildiği görülebilir. Sonuçlar, aerodinamik performansın, deflektör parametrelerinin uygun şekilde seçilmesiyle büyük ölçüde iyileştirilebilir.

Cheng ve ark. (Cheng ve ark., 2017) bu çalışmada, farklı uç hız oranı (TSR) koşulları altında helisel dikey eksenli rüzgar türbinlerinin (HVAWT'ler) güç çıkışı tahmini için 2B LES uygulanmıştır. Küçük veya büyük bir TSR'nin her ikisi de HVAWT'nin güç çıkışının bozulmasına yol açabileceğinden, türbin tasarımı sırasında uygun bir TSR seçmenin gerekli olduğunu gösterir. Bu yazıda, maksimum güç çıkışı, %10 güç katsayısı ile 1.8 TSR koşulunda gerçekleşir. Güç üretimi üzerindeki TSR etkilerinin mekanizmasını anlamak için ayrıntılı akış alanı incelenmiştir. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin (VAWT'ler) güç dalgalanması da araştırılmış ve maksimum güç dalgalanma katsayısının daha düşük TSR koşullarında %150'ye kadar çıkabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, TSR etkilerinin kaynağının, esas olarak, farklı TSR koşulları altında hücum açısı (AOA) ve bıçak-girdap etkileşim fenomeninin varyasyonundan geldiği açıktır. Bu arada, aerodinamik performans üzerindeki üç boyutlu etkileri incelemek için bir 3D U-RANS (Kararsız Reynold Ortalamalı Naiver-Stokes) tam ölçekli simülasyonu yapıldı. Uç girdabı nedeniyle, uçlara yakın hücum kenarındaki statik basıncın arttığını ve daha sonra yüksek yükseklik bölgelerinde güç üretiminin azalmasına neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca akış alanı, üst veya alt kısımlarından kaynaklanan ikinci akıştan da etkilenebilir. Küçük en-boy oranı koşulları altındaki bu büyük üç boyutlu etkiler nedeniyle, toplam güç katsayısı 2D sonuçlara kıyasla yaklaşık %33,3 oranında azalmaktadır. Bu nedenle, ikinci akış ve uç girdap etkilerini ortadan kaldırmak için uçlara veya kanat yüzeyine bazı çitler eklemek gibi, HVAWT'lerin aerodinamik performansı üzerindeki üç boyutlu etkileri ortadan kaldırmaya veya azaltmaya yönelik gelecekteki çabalar ayrılmalıdır.

Du ve ark. (Du ve ark., 2000) araştırmalarında, bir rüzgar türbini kanadının sınır tabakası üzerindeki dönme etkisini incelemek için 3-B sıkıştırılmaz sabit momentumlu integral sınır tabaka denklemleri geliştirilmiştir. Aşağıdaki gibi sonuçlar çıkarılmıştır:

Rotorun dönüşü, rüzgar türbini kanadının sınır tabakası üzerinde güçlü bir etkileşimi bulunmaktadır. Kanat yüzeyindeki ayrılma noktası, özellikle özgün bir rüzgar türbini kanadının iç yarısı için, dönüşle birlikte biraz ertelenebilmektedir. Dönmenin, ayrılmayı yavaşlatmada genellikle avantajlı bir duruma gelmiş olduğu gösterilmektedir. Bu durumda 2 boyutlu şartlara oranla daha yüksek kaldırma ve daha düşük sürtünmeye neden olabilmektedir.

Coriolis ve merkezkaç kuvvetleri 3 boyutlu durma gecikmesinde dikkate değer bir görev üstlenmektedir. 3-D etkileri, temel bir biçimde, sınır tabakasında radyal akışa neden olan merkezkaç ivmesinin ve Coriolis kuvvetlerinin, arka kenara doğru giriş yönünde akışı hızlandırma eğilimindeki sonuçları gösterilmektedir (ters basınç gradyanında bir azalma). Bu, daha aşağı akıştaki bir noktaya ayrılma oluşumunu geciktirir. Yinede, rotasyona etkileri şu anda tam olarak anlaşılmamıştır ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Jin ve ark. (Jin ve ark., 2020) çalışmasında, önerilen HAD sayısal modeli, ikiz dikey eksenli rüzgar türbininin aerodinamik performansının hesaplanmasında doğrulanmıştır ve ikiz ters dönen türbinlerin etrafındaki akışın analizine uygulanarak, gelişmiş güç çıktılarına katkıda bulunan yerel akış mekanizmalarını tanımlamak için uygulanmıştır. İki türbin arasındaki çeşitli boşluk oranlarının ve kanat azimut (istikamet açısı) kaymalarının rüzgar enerjisi üretiminin verimliliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Aşağıdaki gibi sonuçlandırılabilir.

Aerodinamik performans, ikiz dikey eksenli rüzgar türbinler (VAWT) yan yana düzenlendiğinde geliştirilebilir. Bir çift türbinin ters dönen düzeni, gelen akış alanını değiştirir, kanadın rüzgar yönü ve rüzgar altı tarafları arasında daha yüksek bir basınç farkı ile sonuçlanır ve türbinlerde daha büyük bir tahrik torku yaratır. Ek olarak, bu değişikliğin birincil nedeninin, ikiz türbin sisteminde komşu türbinin varlığının yanal serbest akımın yönünü değiştirmesi olduğunu bulduk. Nitekim, akış yönünün değişmesi, pozitif tork üretmeye elverişli olan kanat için hücum açısının değişmesine neden olur.

Ying ve ark. (Ying ve ark., 2015) çalışmalarında, darbe türbini prensiplerine dayanan yeni bir küçük rüzgar türbini hem sayısal bir yaklaşım hem de rüzgar tüneli testi ile araştırılması hakkında çalışmalar yapmıştır. Çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Çok akışlı bir rüzgar enerjisi sistemi için dürtü türbini ilkelerinin kullanılabilirliği açıktır ve ilkelerin uygulanması, bu yeni rüzgar enerjisi sisteminin performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir.

Kılavuz kanatlı bir statorun kullanılması, çok yönlü akışlı rüzgar enerjisi sistemi için serbest akışın rüzgar hızını hızlandırmak için yeni bir yaklaşım sağlamıştır. Sonuçlar, statorun arkasındaki en yüksek rüzgar hızının 1,2 katına yükselebileceğini göstermektedir. Tipik olarak, rüzgar türbini, 8,2 m/s'lik bir rüzgar hızı altında 0,6 güç katsayısına ve 0,17'lik maksimum güç katsayısına ulaştığı görülmektedir.

Shi ve ark. (Shi ve ark., 2014) çalışmalarında dikey eksenli rüzgar türbinin (VAWT) analizi için tutarlı bir girdap aerodinamik modeli sundu.

Model, girdap tipi serbest iz potansiyel akış çözücüsünü yüklerin viskoz düzeltmeleri ile ilgili birleştirme yapmıştır. Model özellikle kanatlara yaklaşırken girdapların yörüngelerini ve yükler üzerindeki sanal bombeleşme etkisini düzelterek bıçak girdap etkileşimlerinin (BVI) karşılaştığı kanat girdap etkileşimlerinin başlangıcını ele alır. İkincisi, potansiyel çözücü tarafından direkt olarak elde edilen sirkülasyonu, ONERA modelinde ek olarak genelleştirilmiş kaldırma sirkülasyonu biçiminde tutarak sigortalanmıştır. Ele alınan çalışmalara dayanarak, sonuçlar çıkarılabilir. Yüksek ila orta uç hızı oranlarında model, kanat yüklerinin azimut değişimleri ile gösterildiği gibi VAWT'nin aerodinamik performansını doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Bu koşullar, hafif durma şartlarında da karşılık gelir. Düşük uç hız oranlarında, model tahminleri kabul edilebilir. Bu tür koşullar altında, bıçak derin stall'a maruz kalır ve bu anlamda, modelde yer alan dinamik stall davranışı yaklaşımının daha az iyi çalışması beklenir. Ana hata kaynağı, yüklerin hesaplanmasının dayandığı 2B kutuplara bağlıdır.

Tran ve ark. (Tran ve ark., 2016) yaptıkları çalışmada, hem kararsız kanat elemanı momentum (UBEM) teorisi hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak, yüzer destek platformunun periyodik dalgalanma hareketleri dikkate alınarak tek kanat rüzgâr türbini modeli için kararsız aerodinamik performans analizleri yapılmıştır. Farklı salınım genliklerine ve frekanslarına sahip platformun çeşitli dalgalanma hareketleri için karşılaştırmalar sunulmuş ve kararsız aerodinamik özellikler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Dönen kanatlara etki eden kararsız aerodinamik yüklerin, yüzer platformun dalgalanma hareketi nedeniyle önemli ölçüde değişme eğiliminde olduğu gözlemlendi. Platformun hareketi ve güçlü girdap etkileşimleri nedeniyle üretilen bıçak uçlu girdap tüpleri arasındaki boşluk mesafelerinde varyasyon olduğu da gösterilmiştir. Bu etkileşimin sonuçlarında, rüzgâr türbini sırasıyla geri (aşağı) veya ileri (yukarı) hareket ettikçe azalma veya artma durumunda olabilmektedir. Ayrıca bu etkileşim, dönen kanatların arkasındaki iz kuvvetinin önemli ölçüde değişmesinin nedeni, kule girişim etkileri ile platform hareketidir. Ek olarak, salınım frekansı ve yer değiştirme genliği arttıkça iz etkileşimlerinin etkisinin artma eğiliminde olduğu önemli bir şekilde bulundu. Bir kanat boyunca farklı açıklık kesitlerindeki yerel bağlı hız dağılımlarının sürekli değişimi de kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Dönen kanat yüzeylerindeki kesitsel basınç dağılımları, platform dalgalanma hareketinin yönü esas alınarak dikkatli bir şekilde değiştirilmiştir.

Jureczko ve ark. (Jureczko ve ark., 2005) rüzgar türbini kanatlarının optimizasyonu hakkında literatür araştırması yapmışlardır. Bir rüzgar türbini kanadının üretim maliyeti, rüzgar türbini üretim maliyetinin yaklaşık %15-20'sidir. Kanat tasarımıındaki yeniliklerin giderleri, rüzgar

türbini üretiminin toplam maliyetinin küçük bir kısmını temsil eder. Bir rüzgar türbini tasarlarken amaç, belirli atmosferik koşullar altında maksimum güç çıkışına ulaşmaktır. Kanadın şeklinin değiştirilmesi, sertliği ve kararlılığı değiştirme etkenlerinden biridir, ancak rüzgar türbininin aerodinamik randımanını değiştirebilir. Rüzgar türbininin dinamik ve mekanik özelliklerini değiştirmenin diğer bir yöntemi, kanatlarda kullanılan kompozit malzemeleri değiştirmektir. Aerodinamik yükün matematiksel tanımı karmaşık olduğundan ve birtakım kısıtlamalar ve hedeflerin karşılanması gerektiğinden, kanadın optimum şeklini belirleme ve optimum kompozit malzemeyi belirleme sorunu karmaşıktır. Bu çalışmanın amacı, rüzgar türbini kanatlarının çeşitli kriterlere göre optimizasyonunu sağlayacak bir bilgisayar programı paketi geliştirmektir. Bir ANSYS parametrik dosyası aracılığıyla çeşitli kanat modelleri tasarlanabilir; modelde bulunan bıçağın kalınlıkları ve modelin ana boyutları değiştirilebilir. Yazarların değiştirilmiş bir genetik algoritma uygulayan programı, çeşitli kısıtlamalara tabi olan çeşitli objektif fonksiyonların optimizasyonunu sağlamaktadır.

Lee, ve ark. (Lee ve ark., 2010) ters yönde dönen bir rüzgar türbininde aerodinamik özelliklerin analizi hakkında çalışma yapmışlardır. Ters yönde dönen bir rüzgar türbininin (CRWT) aerodinamik karakteristiklerini analiz etmek için, 2 kanatlı tek, 4 kanatlı tek ve ters yönde dönen rotor olmak üzere üç rotor konfigürasyonu sayısal yöntem kullanılarak karşılaştırılmıştır. Buradaki yöntem, girdap kafes yöntemine dayanıyordu. Ayrıca NREL faz-VI rotorunun ölçümleriyle doğrulandı. Hesaplanan shaft torkunun deneysel sonuçlarla birlikte iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Hesaplamalar, katılık arttıkça iz eksenel indüksiyon faktörlerinin arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, rotorların etkileşimi nedeniyle, bir CRWT'nin iz eksenel indüksiyon faktörünün, eşit sağlamlığa sahip tek bir rotorkinden biraz daha düşük olduğu gösterilmiştir. Ek olarak, bir CRWT'nin iz açısal endüksiyon faktörünün sıfıra yakın bir değer olduğu gösterildi. Çünkü ön rotor tarafından indüklenen girdap hızı, ters yönde dönen arka rotor tarafından dengelenmektedir. Maksimum güç katsayılarının karşılaştırılması ile CRWT'nin veriminin yarı sağlamlığa sahip tek bir rotordan %30 daha fazla, eşit sağlamlığa sahip tek bir rotordan ise %5 daha az olduğu görülmüştür. Ek olarak, bir CRWT'nin girdap geri kazanımı ile elde edilen aerodinamik avantajın, bir rüzgar türbininin performansını neredeyse hiç etkilemediği gösterildi. Bu çalışmada, eşit dönme hızına, hatve açısına, süpürme alanına ve kanat geometrisine sahip rotor konfigürasyonları basit bir şekilde karşılaştırılmıştır.

Elsakka ve ark. (Elsakka ve ark., 2019) çalışmalrında dikey eksenli bir rüzgar türbini kanadı için hücum açısının HAD analizini incelemiştir.

Hücum Açısının (AOA) tüm çevrim boyunca dağılımının, dikey eksenli rüzgar türbinlerinin (VAWT) genel güç katsayısı üzerinde önemli etkileri vardır ve bu, AOA'nın doğru tahminini gerekli kılar. VAWT boyunca çok karmaşık akış nedeniyle, AOA'nın tahmini için referans noktalarını seçmenin birkaç yolu araştırılmış ve konumlardaki iki referans noktasından gelen akış verilerinin kullanılmasının, yukarı yönde 0,5 kanat profili uzunluğu ve Kanat profilinin her iki yanından 1 kiriş uzaklığı, bir dizi çalışma koşulunda en doğru tahmini verebilir. Yeni yöntem, kapsamlı son işleme gerek kalmadan hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları sırasında hücum açısı bilgilerini hesaplamak ve depolamak için kullanılabilir. Literatürdeki mevcut yöntemle karşılaştırıldığında, önerilen yöntem, küçük rüzgar türbini koşullarına bağlı olarak test edilen üç akış hızı için ortalama karekök hatasını (RMSE) ortalama %33,8'e kadar azaltabilir.

Kim ve ark. (Kim ve ark., 2012) çalışmalarında, kanat esnekliğinin aerodinamik gürültü üzerindeki etkilerini tanımlamıştır. Akışkan yapı etkileşimini dikkate almak için, aerodinamik analiz için NVCM uygulandı. Yapısal dinamik modelleme için Doğrusal Olmayan Kompozit Kiriş Teorisinden yararlanıldı. Son olarak, aerodinamik gürültünün, yani TI gürültüsünün ve TBL-TE gürültüsünün tahmini için FSI ile veya FSI olmadan sayısal yöntemle hesaplanan etkin hücum açısı, kanat deforme geometrisi ve başlangıç hızı gibi akış parametreleri kullanılmıştır. 8x12 m/s üniform akışta, kanat sapması dikkate alındığında ses basıncı seviyesi yaklaşık 1.5-2.5 dB idi ve bu, rijit bir kanadinkine kıyasla düşüktü. Rüzgar hızı, nominal rüzgar hızı olan 12 m/s'nin üzerinde olduğunda, rüzgar türbini kanatçığı, eğim kontrolü nedeniyle kanadın orta ve uç bölgelerindeki düşük hücum açılarında çalıştığından, kanat esnekliği tarafından gürültü önemli ölçüde değişmedi. modern büyük rüzgar türbinleri var. Diğer bir deyişle, 0° civarındaki düşük hücum açısı durumundaki hücum açısı değişiklikleri, 5° civarındaki yüksek hücum açısı durumundakinden daha küçük gürültü seviyesi varyasyonları üretir. Gürültü değerlendirmesiyle ilgili olarak, bu yöntemin FSI dikkate alınarak modern bir büyük rüzgar türbini tarafından üretilen gürültüyü tahmin etmesi çok uzun sürer. Bu nedenle, kanat esnekliğinin aerodinamik gürültüyü etkilediği rüzgar hızlarında, sert bir kanadın ürettiği aşırı tahmin edilen ses basınç seviyeleri düzeltilmelidir.

Mouhsine ve ark. (Mouhsine ve ark., 2018) çalışmalarında, yatay eksenli rüzgar türbininin (HAWT) aerodinamiğinin sonlu elemanlar modelini ve statik yapısal analizlerini uygulamaları yapıldı. Makalenin ilk bölümünde, rüzgar türbini geometri modellemesi, ağ oluşturma ve HAWT sayısal simülasyonu için çalışıldı. Akışkan ve yapısal ağlar arayüzde uyumlu olduğu görüldü. Bunun için birleşik FSI analizi için kullanılabilir. Bu aerodinamik modeller, deformasyonları hafifletmek için yapısal

dinamikleri tanımlayan doğrusal olmayan bir formülasyonla birleştirildi. Kanat tasarımına kapsamlı bir bakış, verimli bir kanat şeklinin, seçilen parametrelere ve seçilen hava profillerinin performansına dayalı aerodinamik hesaplamalarla tanımlandığını gösterildi. Optimum verimli şekil, göbeğe doğru artan genişlik, kalınlık ve bükülme açısı durumuna sahip kanat kesitlerinden dolayı oluşan karmaşıktır. Bu genel şekil fizik kanunları tarafından kısıtlandırılmıştır. Bu durumun değişmesi muhtemel değildir. Bununla birlikte, kanat profillerinin kaldırma ve sürüklenme performansı, optimum aerodinamik performans için tam bükülme açılarını ve giriş uzunluklarını belirleyecektir. Rüzgar türbini kanatlarının geniş ve esnek yapısı nedeniyle belki aeroelastik dengesizlik olacaktır. Kanadın ucunun nominal rüzgar hızında (12 m / s) yer değiştirmesi, türbinin güç performansında bir azalma elde edilir (0,045 m), bu da nominal güçte bir azalma anlamına gelir. Kanadın yapısal modellerinin ve aeroelastik davranışının yoğun bir şekilde incelenmesi için aerodinamiği doğru bir şekilde oluşturulmuştur.

Farrugia ve ark. (Farrugia ve ark., 2014) çalışmalarında bir model açık deniz yüzer rüzgar türbininin aerodinamik performansının araştırılması konusu hakkında çalışmışlardır. Bir model Offshore Yüzer Rüzgar Türbini (OFWT) üzerindeki deneysel sonuçlardan, uyanma kaynaklı tork dalgalanmalarına dair kanıt bulunamadı. Bunun nedeni muhtemelen çok yüksek frekans ve düşük genlikli tork dalgalanmalarını ölçmedeki tork sensörü sınırlamalarıdır. Öte yandan, serbest vorteks simülasyonlarından elde edilen sonuçlar, tek boyutlu platform dalgalanma hareketleri altında aerodinamik torkta dalgalanmaların varlığını göstermiştir. UoM OFWT deneyinden, sabit ve yüzer koşullar arasında gelen rüzgara paralel bir yönde uç girdap yolunun ortalama ve dağılımındaki varyasyonların minimum olduğu bulundu. Bununla birlikte, eksenel endüksiyon faktörü üzerindeki dalga kaynaklı etkilerin önemli olduğu bulundu. Ayrıca hem deneyde hem de sayısal simülasyonlarda, değişken ve sabit koşullar arasındaki ortalama CP'de daha yüksek varyasyonlar gözlemlendi. Gelecekteki OFWT'lerin tasarımı, yorulma sorunlarına yol açabilecek tork dalgalanmalarını azaltmak için yüksek uç hız oranı rejiminde çalışmayı önlemeye yönelik olmalıdır.

Kong ve ark. (Kong ve ark., 2005) tarafından 750 kW'lık orta ölçekli bir yatay eksenli rüzgar türbini sistemi (HAWTS) için bir E-glass/epoxy kompozit kanat tasarlanmış, üretilmiş, test edilmiş ve önerilen tasarım akışıyla değerlendirilmiştir. Rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi için IEC61400-1 uluslararası spesifikasyonu ve Germanisher Lloyd (GL) Düzenlemeleri gereğinde belirtilen farklı yük durumları dikkate alınmıştır. Aerodinamik ve atalet yükleri, buzlanma yükleri, higrotermal ve mekanik yükler gibi farklı yük koşullarına kuvvetli bir şekilde dayanabilen özel bir

kompozit yapı konfigürasyonu önerilmiştir. Önerilen tasarım konfigürasyonunu değerlendirmek için sonlu elemanlar yönteminden (FEM) faydalanarak yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma ile kabul edilebilir bir kanat yapısal konfigürasyonu belirlendi. En baskın tasarım parametreleri, ağırlığın en aza indirilmesi için direk flanşı ve kabuğunun kalınlığı, maksimum stres ve gerilim için ön ve arka direk ağlarının kalınlığı ve konumu, kanat ucu açıklığı için direk flanşının kalınlığı ve genişliği ve bozulma açısı için ön direk ağının konumu. 20 yılı aşkın yorulma ömrü, iyi bilinen S–N lineer hasar denklemi, yük spektrumu ve Spera'nın ampirik denklemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Geliştirilen yapım süreci ve katlamalı kalıplama yöntemine bağlı olarak, prototip kompozit kanatlar üretilmiştir.

Sayed ve ark. (Sayed ve ark., 2012) tarafından sonlu hacim yöntemi kullanılarak farklı rüzgar türbini kanadı profillerinin aerodinamik analizi hakkında çalışma yapmışlardır. Yüksek kayma oranına sahip bir kanat profili, düşük kayma oranına sahip olandan daha yüksek verime sahiptir. Sonuçlardan çıkarılan özet; hücum açısı (AOA), optimum profili belirlemede baskın bir etkiye sahipken, rüzgar hızı optimum profiline etki etmemektedir. Maksimum kayma oranını ve rüzgardan çekilen maksimum gücü elde etmek için optimum çalışma AOA'sı -4° ile 3° arasında olmalıdır. AOA optimum aralığın üzerine çıktıkça kayma oranının düştüğünü ve tüm profiller arasındaki kayma oranları farkının çok düşük olduğu görülmüştür. Rüzgardan en yüksek güç sağlayabilmek için kirişin %40 ile %50 arasında yer alan maksimum kalınlıkta bulunan profiller küçük pozitif çalışma AOA'da kullanılmalıdır. Buna karşılık, kirişin %20 ila %40 arasında kalan en yüksek kalınlıkta bulunan profiller, rüzgardan en yüksek güç elde etmek için düşük negatif çalışma hücum açılarında kullanılmalıdır. Ayrıca sonuçlardan NREL rüzgar türbini profilleri S825, S826, S830 ve S831'in en verimli kanat profilleri olduğu görülmektedir. Hatta düşük ve yüksek rüzgar hızlarında çalışan rüzgar türbinleri için uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Koç ve ark. (Koç ve ark., 2016) tarafından yatay eksenli rüzgar türbinlerinde optimum türbin parametrelerinin belirlenmesi hakkında çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, teorik olarak analiz edilen üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinin aerodinamik tasarım parametreleri incelenmiştir. Bu parametreler doğrultusunda kanat eleman teorisi ve aktüatör disk (açısal) momentum teorisi gibi aerodinamik teoriler değerlendirilmeye alınmıştır. Bu için model geliştirilmiştir. Bu modelde kanatlardan jeneratöre kadar olan bölgede gerçekleşen moment ve güç iletimi incelenip, 2MW güç kapasiteli bir rüzgar türbin kanatların kütlesi, kanat yarıçapı, güç iletiminde dişli oranı ve rüzgar hızı gibi türbin parametrelerinin optimum büyüklükleri tahmin edilmiştir. Çalışma sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Üretici kataloglarında belirtilen türbini için kanatların kütlesi 19500 kg olup, yapılan hesaplamalarda bu güç kapasitesindeki bir rüzgâr türbini için optimum dişli çevrim oranı 150-151 olarak belirlenmiştir.

Türbinin kanat yarıçapı kataloglarda 39,5 m olarak belirtilmektedir. Geliştirilen teorik modele göre optimum kanat yarıçapı ise yaklaşık 40 m olarak tespit edilmiştir.

2 MW güç kapasiteli yatay eksenli rüzgâr türbini için referans alınan türbin parametrelerine ($CP = 0.42$, $\lambda=10$, $mR=19500$ kg, $R=39,5$ m) göre optimum rüzgâr hızı veya nominal hız (V_{opt}) 9 m/s olarak tespit edilmiştir. Literatürde ise üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinleri için nominal hız (optimum hız) değeri 8-15 m/s arasında değişmektedir.

Vardar ve ark. (Vardar ve ark., 2010) tarafından bazı rüzgar türbin rotor modellerinin aerodinamik performanslarını incelenmektedir. Bu çalışmada minyatür olarak imal edilen rüzgar türbin rotorlar için NACA profilleri kullanılmıştır. Ayrıca, her bir rotor formu üzerine gelen rüzgarın içinde barındığı güç değerleri ve her bir rotor formunun uç hızları ortaya konularak, güç katsayıları hesaplanmıştır. Güç katsayıları 0,316 ile 0416 arasında değişkenlik göstermektedir. NACA 4415 ve NACA 5317 profilleri kullanılarak imal edilen rotorlar, 0° burulma açısına sahiptir. Ayrıca bu rotorlar, 10° bağlama açısına sahiptir. En yüksek ideal güç katsayısı 4 kanatlı rotorlarda olduğu görülmektedir. Çalışmanın sonucunda güç katsayısı 0.40 değerinden büyük olan rotorlar en verimli olduğu görülmektedir.

Sicot ve ark. (Sicot ve ark., 2005) tarafından türbülansın yatay eksenli rüzgar türbini aerodinamiği üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmiştir. Türbülans seviyesinin rüzgar türbini aerodinamiği üzerindeki etkileri, giriş uzunluğunun büyüklük sırasına göre integral uzunluk ölçeği ile incelenmiştir. Rüzgar tüneli ölçüm sonuçları, bu tür türbülansın rüzgar türbini gücümüz ve itme gücümüz üzerinde çok düşük bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Bu sonuç tam ölçekli yatay eksenli rüzgar türbinlerine genişletilebilir gibi olduğu görünmektedir. Bu tür türbülans seviyelerini kanat dönüşü ile birleştirmenin etkilerini daha kesin olarak analiz etmek için, yüksek türbülanslı akışlarda yerel rüzgar türbini yükleri üzerinde daha fazla deneysel araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu, 26 basınç musluğu ile donatılmış bir rüzgar türbini kanadında devam ediyor.

Johansen ve ark. (Johansen ve ark., 2009) tarafından maksimum aerodinamik verimlilik için bir rüzgar türbini rotorunun tasarımı hakkında çalışılmıştır. Bu çalışmada, yalnızca maksimum aerodinamik verimliliği dikkate alarak ve yapısal ve tasarım dışı sorunları dikkate almadan üç kanatlı bir rüzgar türbini rotorunun tasarımını açıklamaktadır. Rotor, kanat açıklığının çoğu için sabit endüksiyon varsayılarak tasarlandı, ancak uç bölgesinin yakınında sabit bir yük varsayıldı. Rotor tasarımı, bir AD

modeli kullanılarak elde edildi ve daha sonra hem bir freewake LL yöntemi hem de tam bir 3-D Navier-Stokes çözücü kullanılarak doğrulandı. Üç model kullanılarak mükemmel uyum sağlandı. Küresel mekanik güç katsayısı C_p , 0,51'in biraz üzerinde bir değere ulaşırken, küresel itme katsayısı C_T 0,87 idi; Glauert'in BEM teorisindeki karşılık gelen değerlerin altında olan değerler. Yerel C_p , rotorun iç kısmındaki Betz sınırının biraz üzerine çıktı; yerel C_t , 1.1'in üzerinde bir değere yükseldi. Bu, artan dönüşten kaynaklanan rotorun merkezinin arkasındaki düşük basıncın etkisi de dahil olmak üzere hem C_p hem de C_t 'nin köke doğru artacağını belirten de Vries teorisi ile iyi bir uyum içindedir. Uca doğru, uç düzeltmelerinin yanı sıra sürüklenme nedeniyle hem C_p hem de C_t azalır.

Wang (Wang, 2012) tarafından rüzgar türbini aerodinamiği hakkında kısa bir inceleme yapılmıştır. Rüzgar türbini aerodinamiğindeki son gelişmeler bu belgede seçici bir şekilde sunulmuştur. BEM teorisi, basitleştirilmesinden bağımsız olarak, hala rüzgar türbinleri için günlük bir tasarım aracıdır. Bununla birlikte, BEM yönteminin birçok doğal eksikliği vardır ve atmosferik türbülans, rüzgar kesmesi, derin stall, komşu türbinlerin etkileşimleri, dümen suyu vb. , özünde rüzgar türbini akış alanına hakim olan girdaplarla doğrudan ilgilenmek için daha karmaşık girdap izi modelleri geliştirilmiştir ve bu nedenle, daha fazla doğrulama gerektirmelerine rağmen nispeten güvenilir bilgiler sağlayabilirler. Dinamik durma modelinin ve 3B dönme etkisi modelinin tanıtılması, rüzgar türbini aerodinamik yük hesaplamalarını büyük ölçüde geliştirir. Ancak, ancak çok daha deneysel ve hesaplamalı çalışmalarla geliştirilebilecek daha doğru dinamik stall modellerine ve gecikme stall modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. HAD yöntemleri, rüzgar türbini akış alanlarına derin bir bakış açısı sağlamıştır. Ancak, HAD yöntemleri tasarım amaçları için güvenle kullanılmamaktadır. Bununla birlikte, bilgisayar gücünün artması ve hesaplama tekniklerindeki ilerlemeler ile HAD çözücü, rüzgar türbini aerodinamiğinin analizi için umut verici ve güçlü bir araç haline gelmektedir.

2. SONUÇ

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde önemli bir yere sahip olan rüzgar enerjisinin önemi artmaktadır. Rüzgar enerjisinden verimli bir biçimde faydalanabilmek için rüzgar türbini teknolojilerinde çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu teknolojilerin gelişebilmesi noktasında rüzgar türbinlerinin aerodinamik analizlerinin detaylı bir biçimde yapılması gerekmektedir. Rüzgar türbinlerinin aerodinamik analizleri içerisinde kanat yapıları, hücum açıları, rotor analizleri, konum durumları gibi belli spesifik çalışma alanları bulunmaktadır. Bu çalışma konuları üzerine literatürde çalışmalar yapılmaktadır. Bu kitap çalışmasında, literatürde yer alan güncel rüzgar türbini analiz çalışmaları incelenmiştir. Literatür incelen-

diğinde bilgisayar programlarının analizler için yoğun kullanıldığı görül-müşür. Rüzgar türbini analizlerinde kullanılan programlar genel olarak şu şekildedir: hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi, bıçak ele-manı momentumu (BEM) teorisi, sonlu elemanlar yöntemi (FEM), sonlu elemanlar için kullanılan ANSYS yazılımı. Sonuçlar göstermektedir ki, rüzgar türbinlerinde aerodinamik analizlerinin hem literatür çalışmaları hem de saha çalışmaları için önemlidir. Aerodinamik analizler daha ve-rimli kanat tasarımı için önemli bir önceliğe sahip olacaktır.

REFERENCES

- Kaya, K. ve Koç., E. (2015) *Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı ve Üretim Esasları*, Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 670, s. 38-48.
- Çolak, İ. ve Demirtaş, M. (2008) *Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin TÜR-KİYE'DEKİ Gelişimi*, Türk Bilim Araştırma Vakfı Dergisi, Cilt:1, Sayı:2, Sayfa:55-62
- Liu, Z., Wang, X ve Kang, S, (2014) *Stochastic performance evaluation of horizontal axis wind turbine blades using non-deterministic CFD simulations*, Energy, 73: 126-136, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.107>
- Ashrafi, Z. N., Ghaderi, M. ve Sedaghat, A. (2015) *Parametric study on off-design aerodynamic performance of a horizontal axis wind turbine blade and proposed pitch control*, Energy Conversion and Management, 93: 349–356 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.048>
- Liu, T., Ren, Y. ve Yang, X. (2013) *Nonlinear aeroelastic stability analysis of wind turbine blade with bending–bending–twist coupling*, Journal of Fluids and Structures, 42: 488–502 <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.08.006>
- Liu, Y., Li, P., He, W. ve Jiang, K. (2020) *Numerical study of the effect of surface grooves on the aerodynamic performance of a NACA 4415 airfoil for small wind turbines*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 206: 0167-6105 <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104263>
- Arunvinthan, S., Pillai, S. N. ve Cao, S. (2020) *Aerodynamic characteristics of variously modified leading-edge protuberanced (LEP) wind turbine blades under various turbulent intensities*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 202: 0167-6105 <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104188>
- Jin, X., Wang, Y., Ju, W., He, J. ve Xie S. (2018) *Investigation into parameter influence of upstream deflector on vertical axis wind turbines output power via three-dimensional CFD simulation*, Renewable Energy, 115: 41-53 <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.012>
- Cheng, Q., Liu, X., Ji, H. S., Kim K. C. ve Yang. B, (2017) *Aerodynamic Analysis of a Helical Vertical Axis Wind Turbine*, **Energies**, 10: 1-17 <https://doi.org/10.3390/en10040575>
- Du, Z. ve Selig M.S. (2000) *The effect of rotation on the boundary layer of a wind turbine blade*, Renewable Energy 20: 167-181 [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00109-3)

- Jin, G., Zong, Z., Jiang, Y. ve Zou L. (2020) *Aerodynamic analysis of side-by-side placed twin vertical-axis wind turbines* Ocean Engineering 209 <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107296>
- Ying, P., Chen, Y. K. ve Xu Y. G. (2015) *An aerodynamic analysis of a novel small wind turbine based on impulse turbine principles*, Renewable Energy, 75: 37-43 <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.035>
- Shi, L., Riziotis, V.A., Voutsinas, S.G. ve Wang, J. (2014) *A consistent vortex model for the aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines*, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 135: 57-69 <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.10.002>
- Tran, T. T. ve Kim D. (2016) *A CFD study into the influence of unsteady aerodynamic interference on wind turbine surge motion*, Renewable Energy, 90: 204-228 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.013>
- Jureczko, M., Pawlak, M. ve Mezyk A. (2005) *Optimisation of wind turbine blades*, Journal of Materials Processing Technology 167: 463–471 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.055>
- Lee, Se., Kim, H. ve Lee So. (2010) *Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-rotating wind turbine*, Current Applied Physics 10: 339–342 <https://doi.org/10.1016/j.cap.2009.11.073>
- Elsakka, M. M., Ingham, D. B., Ma L. ve Pourkashanian M. (2019) *CFD analysis of the angle of attack for a vertical axis wind turbine blade*, Energy Conversion and Management 182: 154-165 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.054>
- Kim, H., Lee, S., Son, E., Lee, Se. ve Lee, So. (2012) *Aerodynamic noise analysis of large horizontal axis wind turbines considering fluidstructure interaction* Renewable Energy 42: 46-53 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.019>
- MouhsinePF, S. E., OukassouP, K., IchenialP, M. M., Kharbouch, B. ve Hajraoui, A. (2017) *Aerodynamics and structural analysis of wind turbine blade*, Procedia Manufacturing 22: 747–756 <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.107>
- Farrugia, R., Sant, T. ve Micallef, D. (2014) *Investigating the aerodynamic performance of a model offshore floating wind turbine*, Renewable Energy 70: 24-30 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.043>
- Kong, C., Bang, J. ve Sugiyama, Y. (2005) *Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life*, Energy 30: 2101–2114 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.08.016>
- Sayed, M. A., Kandil, H. A. ve Shaltot A. (2012) *Aerodynamic analysis of different wind-turbine-blade profiles using finite-volume method*, Energy Conversion and Management 64: 541–550 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.05.030>

- Koç, E. ve Şenel M. C. *Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Optimum Türbin Parametrelerinin Belirlenmesi-Teorik Yaklaşım*, Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 676, s. 32-40
- Vardar, A., İzli, N. ve Kurtulmuş F. (2010) *Aerodynamic Performance of Some Wind Turbine Rotor Models*, Uludağ Üniversitesi ZİRAAT FAKÜLTESİ DERGİSİ, 2010, Cilt 24, Sayı 2, 1-9
- Sicot, C. Devinant, P. Laverne, T. Loyer, S. and Hureau, J. *Experimental Study of the Effect of Turbulence on Horizontal Axis Wind Turbine Aerodynamics* Wind Energy 9: 361-370 <https://doi.org/10.1002/we.184>
- Johansen, J., Madsen, H. A., Gaunaa, M. ve Bak, C. *Design of a Wind Turbine Rotor for Maximum Aerodynamic Efficiency*, Wind Energy 12: 261–273 <https://doi.org/10.1002/we.292>
- Wang, T. (2012). A brief review on wind turbine aerodynamics. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2(6), 062001. <https://doi.org/10.1063/2.1206201>

“

BÖLÜM 5

BÖBREK HÜCRELİ KARSİNOMUN DERİN ÖĞRENME İLE SINIFLANDIRILMASI

Cihan AKYEL¹

”

¹ Dr.; MEB İnşaat Emlak Genel Müdürlüğü. cihan.akyel1@gazi.edu.tr ORCID
No: 0000-0003-1792-8254

1- GİRİŞ

Böbrek kanseri ileri yaşlarda görülme sıklığı artan erkekler arasında daha yaygın görülen bir türdür (Ertener ve ark., 2022). Böbrek hücreli karsinom (BHK) böbrek kanserinin %90'ını oluşturan en yaygın görülen türdür. BHK için sigara kullanımı, hipertansiyon, aşırı kilo gibi etmenler risk faktörü olarak görülmektedir (Üyetürk ve ark., 2004).

BHK ürolojik kanserler arasında en ölümcül olanıdır. Bilgisayarlı tomografi (BT) ve ultrason görüntüleri incelenerek BHK'nın teşhisi ve evresi tahmin edilebilmektedir (Demir ve Balçık, 2022). Gelişen bilgisayar temelli yöntemler (BDY) ile kanser başta olmak üzere birçok hastalığın teşhisi yapılabilmektedir. Bu yöntemler düşük hata oranı ve maliyetiyle ön plana çıkmaktadırlar.

Kanser teşhisi için kullanılan BDY arasından derin öğrenme görüntü işleme algoritmaları kendilerine literatürde sıkça yer bulmaktadırlar. Derin öğrenme ile yapılacak teşhis için etiketleri ya da bölütleme maskeleri olan veri setleri gerekmektedir. Bu veri setleri ile denetimli derin öğrenme yoluyla eğitimler yapılabilmektedir. Burada eğitime alınacak görüntüler görüntü işleme algoritmaları ile ön işlemden geçirilerek modellerin başarısı artırılabilir. Eğitim sonucunda yeni görüntülerin sınıflandırılması ya da bölütlenmesi mümkün olmaktadır. Devam eden paragraflarda BHK'ya ait BT görüntülerinin sınıflandırılmasını içeren çalışmalar aktarılmıştır.

Abdullah ve ark., (2022) çalışmalarında KAUH hastanesinden elde ettikleri BT görüntülerini içeren bir veri setini kullanmışlardır. Bu veri setini üzerinden farklı modellerle tümör, kist ve taş olmak üzere BT görüntülerini derin öğrenme ile üç sınıfa ayırmışlardır. Önerdikleri model ile %97 eğitim başarısı elde etmişlerdir.

Yap ve ark., (2020) böbrek kanserinin sınıflandırılması için AdaBoost temelli bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada %75 eğitim başarısı elde edilmiştir. Bir diğer çalışma Schieda ve ark., (2020) tarafından ortaya konulmuştur. XGBoost temelli bir yöntem ile %77 başarı elde etmişleridir.

Bazı çalışmalar KiTS gibi halka açık veri setlerinin dışında hastanelerden topladıkları veri setleri çalışmalarında kullanabilmektedir. Bu duruma örnek Han ve ark., (2019) çalışmalarında yer almıştır. Bu çalışmada 169 BHK vakasına ait görüntüler kullanılmıştır. Modifiye edilmiş GoogLeNet temelli bir algoritma ile %85 eğitim başarısı elde edilmiştir.

Derin öğrenme algoritmalarına alınacak girdi görüntüleri ön işlemde geçirilebilmektedir. Bu durum derin öğrenme algoritmasının başarısını artırmaktadır. Şirin ve Güveniş, (2022) çalışmalarında KiTS veri setindeki görüntüleri normalize ederek ön işlemden geçirmişlerdir. Çalışmada des-

tek vektör makineleri ile yapılan sınıflandırmada %80 test başarıları elde edilmiştir. Sheehan ve ark., (2019) derin öğrenme ile yaptıkları sınıflandırmada %81 başarı elde etmişlerdir. Skalski, (2016) “vascular tree” yöntemi ile BT görüntülerini sınıflandırmıştır. Çalışmada %92.1 başarı elde edilmiştir.

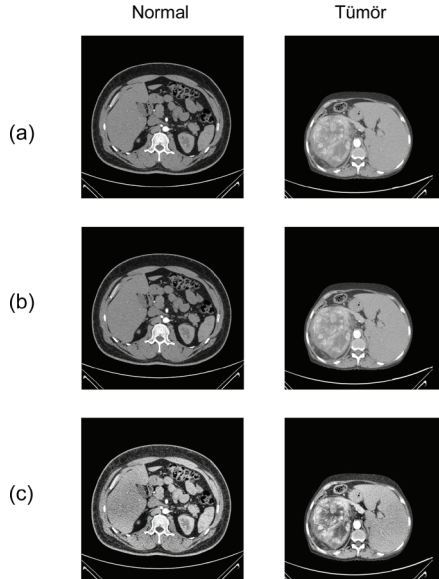
Literatüre bakıldığında BT görüntüleri ve biyopsi görüntüleri ile böbrek hücreli kanserin sınıflandırılabilirliği görülmüştür. Bu çalışmada kaggle tarafından halka açık olarak erişime açılan BT görüntülerinden oluşan bir veri seti kullanılmıştır. İkinci bölümde kullanılan yöntem, üçüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Dördüncü bölümde elde edilen sonuçlar ışığında tartışma bölümüne yer verilmiştir.

2- MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada kaggle’a ait 5000 tümör ve 5000 normal olmak üzere toplam 10000 BT görüntüsünü içeren bir veri seti kullanılmıştır (Multi Cancer, 2022). Bu veri seti ön işlem aşamasından sonra %70 eğitim ve %30 test olarak ayrılmıştır.

Görüntü Ön İşleme

Bu aşamada görüntüler önce normalize edilmiştir. Daha sonra görüntüler clahe yöntemi ile kontrast iyileştirme işlemine tabi tutulmuştur. Süreç Şekil 1’de görülmektedir ((a): Orijinal Görüntü, (b): Normalizasyon İşlemi (c): Clahe İşlemi).



Şekil 1. Görüntü ön işleme

Ön işleminden geçirilen görüntüler 36'lık 256x256 boyutunda dilimlere ayrılmıştır. Bu sayede toplamda 1536x1536 çözünürlüğüne kadar olan görseller piksel kaybı olmaksızın eğitime alınabilmektedir.

Sınıflandırma Modeli

Sınıflandırma algoritmasında ön eğitilmiş Xception modeli ile önerilen sıra tabanlı algoritma birleştirilmiştir. Algoritmaya ait kodlar Şekil 2'de görülmektedir. Algoritmada kullanılan dropout (bırakma) katmanıyla sistemin ezbere düşmesi önlenmeye çalışılmıştır. Tablo 1 ise bu model için kullanılan hiper parametreleri göstermektedir.

```
training_shape = (256,256,3)
base_model = Xception(include_top=False, weights="imagenet", input_shape=training_shape)
for layer in base_model.layers:
    layer.trainable = True
n_classes = 2
model = base_model.output
model = BatchNormalization()(model)
model = MaxPool2D()(model)
model = Flatten()(model)
model = Dropout(0.4)(model)

output = Dense(n_classes, activation='softmax')(model)
model = Model(inputs=base_model.input, outputs=output)
```

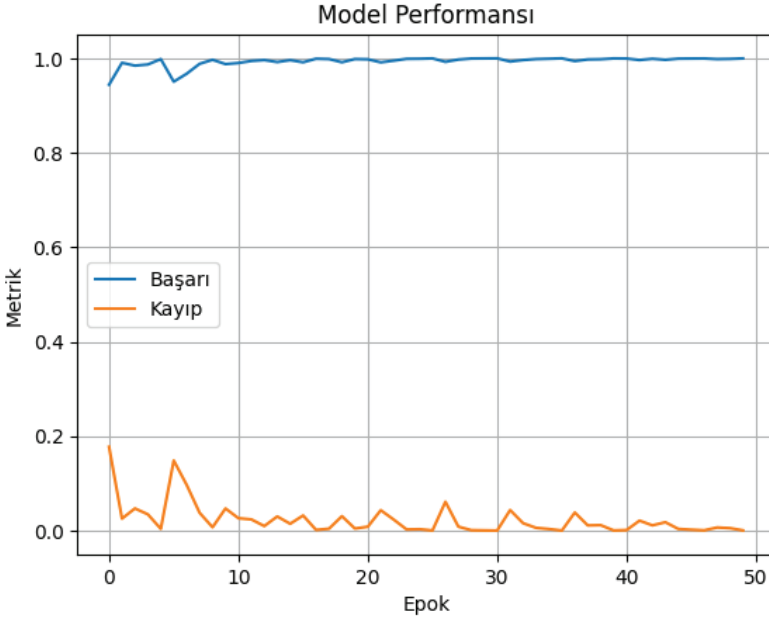
Şekil 2. Sınıflandırma algoritması

Tablo 1. Hiper parametreler

Parametre	Değer
Öğrenme Katsayısı	0.0001
Çıkış Fonksiyonu	Sigmoid
Epok	50
Giriş Boyutu	256x256x3

3- BULGULAR

Çalışma kapsamında önerilen hibrit yaklaşımla (önerilen derin öğrenme algoritması + görüntü işleme) elde edilen sonuçlar Tablo 2'de görülmektedir. Bu tabloda diğer çalışmaların başarı sonuçlarına da yer verilmiştir. Şekil 3'te eğitim grafiği yer almaktadır.



Şekil 3. Eğitim grafiği

Tablo 2. Eğitim aşaması sonuçları

Referans	Başarı (%)
[4]	97
[5]	75
[6]	77
[7]	85
[8]	80
[9]	81
[10]	92.1
Önerilen Yaklaşım	99.800

SONUÇ

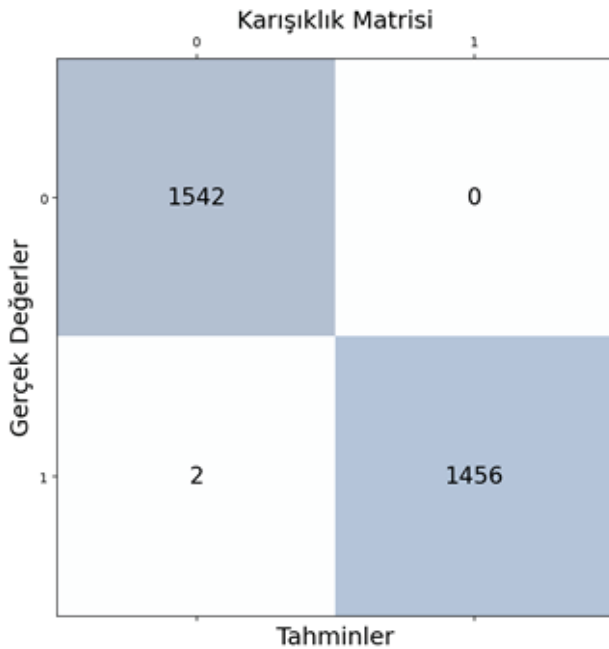
Çalışma kapsamında önerilen yaklaşım sırasıyla %99.800 eğitim başarısı, %99.700 doğrulama başarısı, %100 tahmin (precision), %100 özgüllük (specificity), %100 hassasiyet (sensitivity) ve %100 duyarlılık (recall) değerlerini elde etmiştir. Sonuçlara ait karışıklık matrisi Şekil 3'te görülmektedir. Bu değerler yaklaşımın başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca normal ve tümör ayırımında her iki sınıf içinde yüksek başarı görülmüştür.

Confusion Matrix

[[1542 0]

[2 1456]]

	precision	recall	f1-score	support
0	1.00	1.00	1.00	1542
1	1.00	1.00	1.00	1458
accuracy			1.00	3000
macro avg	1.00	1.00	1.00	3000
weighted avg	1.00	1.00	1.00	3000



Şekil 3. Karışıklık matrisi

REFERANSLAR

- Ertener, Ö., Ekmekci, S., ve Küçük, Ü. (2022). Evaluation of the Importance of Advanced Age for Histopathological Prognostic Data in Patients with Kidney Tumor. *Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Tıp Dergisi*, 9(2), 147-152.
- Üyetürk, Ü., Üyetürk, U., ve Metin, A. (2004). Böbrek Hücreli Kanseri. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 6(1), 1-17.
- Demir, H., ve Yalçın Balçık, P. (2022). Ödeyici Kurum Bakış Açısıyla İleri Evre Böbrek Kanseri Kaynak Kullanımı: Eğitim ve Araştırma Hastanesi Örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 13(34), 520-534.
- Abdullah, M., Alzu'bi, D., Hmeidi, I., AlAzab, R., Gharaibeh, M., El-Heis, M., Almotairi, K. H., Forestiero, A., Hussein, A. M., ve Abualigah, L. (2022). Kidney Tumor Detection and Classification Based on Deep Learning Approaches: A New Dataset in CT Scans. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022, 1-22.
- Yap, F. Y., Varghese, B. A., Cen, S. Y. (2020). Shape and texturebased radiomics signature on ct effectively discriminates benign from malignant renal masses. *European Radiology*, 31(2), 1011–1021.
- Schieda, N., Nguyen, K., Thornhill, R. E., McInnes, M. D. F., Wu, M., ve James, N. (2020). Importance of phase enhancement for machine learning classification of solid renal masses using texture analysis features at multiphase ct. *Abdominal Radiology*, 45(9), 2786–2796.
- Han, S., Hwang, S. I., ve Lee, H. J. (2019). The Classification of Renal Cancer in 3-Phase CT Images Using a Deep Learning Method. *J Digit Imaging*, 32(4), 638-643.
- Şirin, D., ve Güveniş, A. (2022). Predicting Kidney Tumor Subtype from Ct Images Using Radiomics and Clinical Features. *Natural & Applied Sciences Journal*, 5(1), 1-8.
- Sheehan, S., Mawe, S., Cianciolo, R. E., Korstanje, R., ve Mahoney, J. M. (2019). Detection and Classification of Novel Renal Histologic Phenotypes Using Deep Neural Networks. *The American Journal of Pathology*, 189, 1786–1796.
- Skalski, A. (2016). Kidney tumor segmentation and detection on computed tomography data. *The 2016 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST) Kongresine Sunulmuş Bildiri*.
- Multi Cancer Dataset, <https://www.kaggle.com/datasets/obulisainaren/multi-cancer>, 12 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.

“

BÖLÜM 6

DERİN ÖTEKTİK ÇÖZÜCÜLER: GENEL ÖZELLİKLERİ VE GIDA SANAYİNDE KULLANIM OLANAKLARI

Çağlar Mert AYDIN¹

Alper GUVEN²

”

1 Dr. Öğr.Gör.; Güzel Sanatlar Tasarım ve Mimarlık Fakültesi Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü. cmaydin@munzur.edu.tr ORCID No: 0000-0003-4078-7410

2 Doç. Dr.; Güzel Sanatlar Tasarım ve Mimarlık Fakültesi Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü. agueven@munzur.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6310-4240

1. GİRİŞ

Çözücü bir katı, sıvı veya gaz maddeyi çözerek çözelti oluşturan maddelere verilen genel addır. Günümüzde çözücü olarak genellikle organik kimyasallar kullanılmakta olup, kozmetik sanayisinden ilaç sanayisine kadar çeşitli birçok sektörde kullanım olanakları bulunmaktadır. Bu kimyasallar fonksiyonel özelliklerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Bu sınıflar; doymuş hidrokarbonlar (metan, etan, propan, butan), doymamış hidrokarbonlar (etilen), halkalı hidrokarbonlar (sikloheksan), aromatik hidrokarbonlar (benzen, tolüen), klorlu hidrokarbonlar (kloroform, karbon tetraklorür) ve alkoller (etil alkol, metil alkol)'dir (Desimone, 2002). Sınıflarına göre farklı sektörlerde kullanım olanaklarına sahip olmalarına karşın, kullanılmaları neticesinde çevre ve insan sağlığına verdikleri zararlar benzerlikler gösterir. Organik kimyasal kullanımının çevreye verdiği zararların başında hava kirliliği, sera gazları oluşumu, ozon tabakasının incilmesi, su ve toprak kirlenmeleri gelmekte iken insan sağlığına olan başlıca zararları çeşitli ölümcül hastalıklar (kanser, siroz gibi) ile çeşitli hastalık ve alerjenlere (kusma, baş ağrısı, kaşıntı gibi) sebebiyet vermektedir (Joshi ve Adhikari, 2019).

Yeşil kimya terimi ilk olarak 1990'ların başında ortaya çıkmıştır. Geleneksel çözücülerin doğaya ve canlı yaşamına verdiği zararları azaltmak ve hatta engelleme amacını gütmektedir. Yeşil kimya “tehlikeli maddelerin kullanımını ve üretimini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak için kimyasal ürünlerin ve işlemlerin tasarlanması” olarak tanımlanması yapılmıştır (Anasta ve Warner, 1998). Yeşil kimya ile amaçlanan, zararlı kimyasal ürünlerin yerine alternatif ürünlerin bulunması, böylece çevreye zarar vermeyen bileşiklerin tasarlanması ve kimyasal atık oluşumunun azaltılması veya hatta tamamen sıfırlanmasıdır. Bunun için Anastas ve Warner 1998 yılında yeşil kimya terimini tanımlayan 12 temel ilkeyi belirlemişlerdir. Bu ilkeler yeni kimyasal ürün ve süreçlerin tasarımında ve prosesinde kılavuz niteliğinde kullanılmaktadır (Söğüt ve Çelebi, 2020). Anasta ve Warner (1998)'in belirlemiş oldukları 12 temel ilke şunlardır;

1. Atık oluşumunun azaltılması ve hatta mümkünse tamamen engellenmesi.
2. Atık atom oranının minimum düzeye indirilmesi.
3. İnsan sağlığına ve çevreye zarar vermeyen kimyasalların tasarlanması böylece tehlikeli malzemelerin kullanımının en aza indirilmesi.
4. Kimyasal kirliliği az ve işlevi fazla olan yeni güvenli kimyasalların tasarlanması.
5. Yardımcı olarak kullanılan maddelerin tüketiminin minimuma indirilmesiyle atık oluşumunun engellenmesi.

6. Kimyasal üretim sürecinde enerji kullanımının en aza indirilmesi.
7. Mümkün olduğunca yenilenebilir madde kullanımının sağlanması.
8. Yan ürün oluşumunu minimum seviyeye indirilmesiyle atık oluşumunun engellenmesi.
9. Kimyasal tepkime hızını değiştirmek amacıyla yeniden kullanılabilir katalizörlerin kullanılması ve bu katalizörlerin tekrar tekrar bozulmadan kullanılmasıyla atık oluşumunun önüne geçilmesi.
10. Üretim sürecinde kullanım ömrü sonlanan kimyasal ürünlerin çevreye zarar vermeyecek şekilde bozulmalarının yapılması.
11. Kirlilik unsurlarının hangi aşamada oluştuğunun tespit edilmesi ve bu aşamaların kirlilik oluşturmaması için gerekli çözümlerin gerçekleştirilmesi.
12. Kullanılan maddelerin patlama, yangın gibi kimyasal kaza olasılığı daha düşük kimyasalların tercih edilmesidir.

Gıda sanayisi klasik çözücülerin yaygın olarak kullanıldığı ve insanların günlük olarak ihtiyaç duydukları besinlerin üretildiği bir endüstri dalıdır. Bundan dolayı yeşil kimya ile alakalı çalışmalar özellikle bu alana yoğunlaşmıştır. Gıda endüstrisi kavramının standart bir tanımlaması bulunmamaktadır. Bunun nedeni ise sektörün doğal yapısından dolayı çok çeşitli alt sektörlerle sahip olması ve herhangi bir sınır tanımlama yapılmasının güç olmasıdır (Massoud ve diğ., 2010). Bu amaçla gıda sanayi kavramının tanımlanmasında Amerikan Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı Ekonomik Araştırma Servisinin (USDA ERS) uyguladığı “gıda maddelerini koruyan, hazırlayan, paketleyen, dönüştüren veya proses eden endüstriyel işlemler” tanımlaması kullanılacaktır. Gıda endüstrinde proses basamakları sektöre göre değişmekte olup, yeşil kimya uygulamaları her bir proses işlem basamağı için ayrıntılı araştırılmaktadır. İlk olarak 2004 yılında Abbott ve diğ. tarafından klasik çözücü çeşitlerine alternatif olarak derin ötektik çözücülerin (DÖÇ) kullanılması önerilmiştir. Smith ve diğ. 2014 yılında ise derin ötektik çözücülerin formülasyonunu tanımlamasını şu şekilde yapmışlardır;

$$\text{Cat}^+ \text{X} \cdot \text{zY}$$

Cat⁺: Amonyum, Fosfonyum veya Sülfonyum katyonu

X: Lewis Bazı

Y: Lewis Asidi

z: Anyonla etkileşime giren Y molekül sayısı

Derin ötektik çözücüler faz diyagramında iki veya daha fazla bileşimin karıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Abbott ve diğ. (2006) derin ötektik çözücülerin oluşumunda kullanılan bileşenleri karakterize etmişlerdir. Buna göre DÖÇ’de en az bir hidrojen bağı alıcı donör (HBA) ve bir hidrojen bağı verici donör (HBD) bulunduğu, HBA ile HBD arasındaki güçlü hidrojen bağı sayesinde DÖÇ oluşumunun gerçekleşmektedir. HBD olarak genellikle şekerler, amino asitler, karboksil asitler, aminler gibi kimyasallar değerlendirilirken HBA olarak kolin klorür, çinko klorür, gliserin gibi kimyasallar kullanılmaktadır. HBA çeşidine göre DÖÇ oluşumu ve verimi değişim göstermektedir. HBD ile HBA arasındaki güçlü hidrojen bağı sayesinde, oluşan yeni çözücünün erime noktası kendisine oluşturan bileşenlere göre daha düşük olmaktadır (Abbott ve diğ., 2004). Bazı derin ötektik çeşitlerinin erime noktaları Tablo 4.1.’de gösterilmektedir;

Tablo 4.1. Bazı derin ötektik çözücü çeşidinin erime noktası (Li ve diğ., 2015).

Tablo 4.1. Bazı DÖÇ çeşitlerinin erime noktası (Li ve diğ., 2015).

HBA	Erime Noktası (°C)	HBD	Erime Noktası (°C)	Molar Oran	DÖÇ’ün Erime Noktası
Kolin Klorür	303	Üre	134	1:2	12
Kolin Klorür	303	Tiyo üre	175	1:2	69
Kolin Klorür	303	1-metil üre	93	1:2	29
Kolin Klorür	303	Sitrik Asit	149	1:1	69
Kolin Klorür	303	Benzoik Asit	122	1:1	95
Kolin Klorür	303	Oksalik Asit	190	1:1	34
Çinko Klorür	293	Üre	134	1:1	9
Çinko Klorür	293	Asetamit	81	1:1	-16
Çinko Klorür	293	Etilen Glikol	-12.9	1:1	-30
Çinko Klorür	293	Heksanediol	42	1:1	-23

Derin ötektik çözücülerin gıda sanayi sektörlerinde farklı şekillerde kullanım imkanı bulunmaktadır. Toksik etkilerinin olmamaları, doğaya zarar vermemeleri, biyo bozunurluklarının yüksek olmaları, bileşenleri-

nin ucuz ve kolay bulunabilmesi ile yenilenebilir olmaları gibi özellikler derin ötektik çözücülerini önemli kılmaktadır (Shahbaz ve diğ., 2012). Ayrıca gıda endüstrisi insanların yaşamlarını devam ettirebilmeleri için günlük olarak tüketmek zorunda oldukları besin maddelerini karşılaması bakımından oldukça önemlidir. Bu derlemede ilk olarak derin ötektik çözücülerin sahip oldukları genel özellikleri değerlendirilmiş, ikinci olarak derin ötektik çözücülerle alakalı yapılmış çalışmalarda bulunan bulgular kullanılarak derin ötektik çözücülerin gıda sanayisinde kullanım olanaklarının ve kullanılması durumunda yaratacağı etkilerin yorumlanması yapılmıştır.

2. DERİN ÖTEKTİK ÇÖZÜCÜLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Derin ötektik çözücüler farklı şekillerde oluşturulabilmektedirler. Bu da DÖÇ çeşitlerinin kendilerine has özelliklere sahip olmalarını sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda DÖÇ oluşumunda kullanılan bazı etmenlerin (bileşen çeşitleri, bileşenlerin birbirleriyle hangi molar oranda karıştıkları, su ilave edilme durumu gibi) DÖÇ özelliklerinde farklılaşmaya sebebiyet verdiği açıklanmıştır (Garcia ve diğ., 2015; Ljardar ve diğ., 2022). DÖÇ çeşitlerinde farklılaşan özelliklerin başında yoğunluk, viskozite, erime noktası, polarite gibi fizikokimyasal özellikler gelmektedir.

Yoğunluk bir maddenin bir cm^3 'lük kütlelerinin, aynı durumdaki $+4^\circ\text{C}$ 'lik suya göre oranı olup, derin ötektik çözücülerde çeşide göre değişim göstermektedir (Abbott ve diğ., 2007). Literatürdeki çalışmalarda DÖÇ çeşitlerinin yoğunlukları $1.0\text{--}1.6\text{ g/cm}^3$ aralığında açıklanmıştır (Abbott ve diğ., 2007; Elgharabawy ve diğ., 2020; Shahbaz ve diğ., 2012; Xu ve diğ., 2020; Zhang ve diğ., 2012). Abbott ve diğ. (2007) kolin klorür ile gliserol'ü $1:2$ molar oranında karıştırarak hazırladıkları DÖÇ'te yoğunluğu 1.18 g/cm^3 bulmalarına karşın aynı bileşenleri $1:3$ molar oranında karıştırdıklarında 1.2 g/cm^3 yoğunluk belirlemişlerdir. Ayrıca çinko klorür ile üre'yi $1:3.5$ mol oranında karıştırarak hazırladığı DÖÇ'te 1.63 g/cm^3 yoğunluk tespit etmişler, çinko klorür ile etilen glikol'ü $1:4$ mol oranında kullanarak hazırladığı DÖÇ'te 1.45 g/cm^3 saptamışlardır. Bu da DÖÇ bileşenlerinin ve bileşenlerin birbirlerine göre molar oranlarının, oluşan DÖÇ'ün yoğunluğunu etkileyebildiğini göstermektedir. Bazı DÖÇ çalışmalarında, DÖÇ oluşumunda su ilave edilmiş (Cui ve diğ., 2015; New ve diğ., 2019), su ilavesinin DÖÇ yoğunluğunu önemli düzeyde etki etmediğini bulunmuştur (El Achkar ve diğ., 2019).

Viskozite akışkanlığa karşı gösterilen direnci ifade etmektedir. Derin ötektik çözücüler yüksek viskoziteye sahiptirler. Bu durum DÖÇ çeşitlerinin kullanım imkanlarını sınırlandırmaktadır (Meneses ve diğ., 2019). Yüksek viskozite DÖÇ akışkanlığıyla alakalı problemler çıkarmakta ve

kütle transferinin daha az olmasına sebebiyet vermektedir. Literatürdeki çalışmalarda DÖÇ çeşitlerinin viskozitesi 10 centipoise ile 120 poise aralığında bulunmuştur (Abbott ve diğ., 2007; Dagostino ve diğ., 2011; Shahbaz ve diğ., 2012). Su ilavesinin DÖÇ çeşitlerinin viskozitelerini düşürdüğü belirlenmiştir (Yadav ve Pandey, 2014). Cui ve diğ. (2015) farklı oranlarda (%0- 90) su ilavesinin DÖÇ çeşitlerinin ekstraksiyon verimini belli bir orana kadar arttırdığını ve en yüksek ekstraksiyon veriminin %30 su ilave edilmesi durumunda elde edildiğini rapor etmişlerdir. Farklı bileşenleri kullanarak DÖÇ hazırlamış olmalarına karşın Cui ve diğ. (2015) çalışmalarının sonucu ile Zhang ve Wang (2017) çalışmalarının sonucu uyumluluk göstermektedir. Yine Zhang ve Wang (2017) maksimum ekstraksiyon verimine %30 su ilave edilmesi durumunda ulaşıldığını bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada ise %50 su ilavesine kadar DÖÇ çeşitlerindeki ekstraksiyon verimlerinin arttığı, ancak %50 su ilave edilmesi durumunda verimde düşmenin başladığı bulunmuştur (New ve diğ., 2019). Bu durum, DÖÇ bileşenleri (HBA ile HBD) arasında oluşan hidrojen bağlarından kaynaklanmış olabileceğine, su ilavesi durumunda bu bağların zayıfladığına yorumlanabilir. Ayrıca sıcaklığın DÖÇ viskozitesini etkilediği, sıcaklık arttıkça DÖÇ viskozitesinin arttığı, bunun da DÖÇ verimini etkilediği açıklanmıştır (Zhou ve diğ., 2018). Ancak Hsieh ve diğ. (2019) sıcaklık ile DÖÇ verimi arasındaki doğru orantının belli bir seviyeye kadar geçerli olduğunu bildirmişlerdir. Hsieh ve diğ. (2019) sıcaklığın 50°C'ye kadar arttıkça DÖÇ (L-karnitin ile 1,3-bütandiol) veriminin arttığını ancak sıcaklığın 50°C'den 60°C'ye çıkarıldığında DÖÇ veriminde azalmanın gerçekleştiğini rapor etmişlerdir. Bu sonuç Zhou ve diğ. (2018) çalışmasında da bulunmuştur. Zhou ve diğ. (2018) çalıştığı sıcaklık derecelerinin (30°C -40°C -50°C ve 60°C) DÖÇ verimine olan etkilerini incelemiş, maksimum verimi 40°C'de elde etmişlerdir. DÖÇ çeşitlerinin erime noktaları düşük olmasından dolayı sıcaklık belli bir seviyeye kadar arttıkça verimin arttığı, ancak belli bir seviyeden sonra DÖÇ çeşitlerinde erimenin gerçekleşmesinden verimini azaldığı düşünülmektedir.

Erime noktası maddelerin ayırılabilirliğinde kullanılan bir özelliktir. Derin ötektik çözücülerin erime noktaları, bileşenlerinin erime noktalarına göre daha düşüktür. Her bir DÖÇ çeşidinin erime noktası aynı olmayıp, bileşenleri (HBD ile HBA) arasında oluşan hidrojen bağların gücüne göre değişim göstermektedir (Desimone, 2002). Literatürdeki çalışmalarda HBD ile HBA bileşenlerinin mol oranlarına göre DÖÇ çeşitlerindeki erime noktalarında değişim gözlemlenmiştir (Abbott ve diğ., 2007; Dagostino ve diğ., 2011; Shahbaz ve diğ., 2012; Xu ve diğ., 2020; Zhang ve diğ., 2012). DÖÇ oluşumunda genel olarak kolin klorür kullanılmaktadır. Kolin klorür'ün erime noktası 303°C olmasına karşın kolin klorür'lü DÖÇ çeşitlerinin erime noktaları 150°C'nin altındadır (Abbott ve

diğ., 2004; Abbott ve diğ., 2007; Florindo ve diğ., 2014; Garcia ve diğ., 2015; Ling ve diğ., 2020; Liu ve diğ., 2019; Makos ve diğ., 2018; Maugeri ve diğ., 2012; Zhang ve diğ., 2012). Kolin klorür ile oksalik asit (erime noktası:190°C) 1:1 mol oranında karıştırılmasıyla oluşan DÖÇ'ün erime noktası 34°C, kolin klorür ile üre (erime noktası:134°C) 1:2 mol oranında karıştırılmasıyla elde edilen DÖÇ'ün erime noktası 12°C olarak bulunmuştur (Florindo ve diğ., 2014; Garcia ve diğ., 2015). Bu da bileşen çeşitlerinin, DÖÇ çeşidinde gözlemlenen erime noktasını etkilediği şeklinde yorumlanabilmektedir.

Çözülme, çözen ile çözücünün molekülleri arasındaki etkileşimi ifade etmede kullanılmaktadır. Çözünen maddeler kendileriyle aynı özelliğe veya tamamlayıcı özelliğe sahip olan çözücüler kullanılarak elde edilebilmektedirler. Bu yüzden polarite çözücü seçiminde önemli rol oynamaktadır (Xu ve diğ., 2020). Derin ötektik çözücülerin polaritesi bileşimdeki HBD ile HBA'nın mol oranlarına göre değişim gösterebilmektedir (Abbott ve diğ., 2007). Abbott ve diğ. (2007) kolin klorür ile gliserolü 1:2 mol oranında karıştırarak polaritesi 58.28 olan DÖÇ elde ederken 1:3 oranında karıştırdıklarında elde ettikleri DÖÇ'ün polaritesi 57.96 olarak belirlemişlerdir. Shahbaz ve diğ. (2012) kolin klorür ile gliserolü 1:1 mol oranında karıştırarak polaritesi 58.49 olan DÖÇ oluşturmuşlardır. Bu çalışmalarda kolin klorür'ün mol oranı arttıkça DÖÇ polaritesinde artış olduğu, ancak kolin klorür'ün DÖÇ polaritesi üzerindeki rolü tam olarak bilinmemektedir (Shen ve diğ., 2019). Çeşitli çalışmalarda kolin klorür'ün mol oranında gerçekleşen değişimin DÖÇ verimini etkileyebileceği ifade edilmiştir. Li ve diğ. (2016) kolin klorür ile laktik asit'i farklı mol oranlarında (1:2, 1:4, 1:6, 1:8, 1:10 ve 1:12) karıştırmış, laktik asit'in mol oranı arttıkça DÖÇ'lerin çözme veriminde artış olduğunu ancak 1:12 mol oranında DÖÇ çeşidinin çözme veriminde azalma olduğunu bulmuşlardır. Başka bir çalışmada, kolin klorür ile laktik asit'i 1:1, 1:2 ve 1:4 mol oranlarında karıştırarak hazırlanan DÖÇ'lerde verim, mol oranı 1:2 iken 1:1 mol oranına göre daha fazla olduğu 1:4 iken 1:2 mol oranına göre ise daha az olduğu açıklanmıştır (Li ve diğ., 2015). Sonuçlar arasında gözlemlenen farklılığın, DÖÇ polaritesi dışında başka faktörlerin (sıcaklık, süre gibi) de etkili olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Pan ve diğ. (2017) çözme süresini 4 saatten 8 saate arttırmaları neticesinde DÖÇ çeşidinin veriminde artış gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Başka bir çalışmada, çözme süresi artırılarak DÖÇ veriminin artırılabilceği, aynı zamanda oluşan atık miktarında da azaltılabileceği bildirilmiştir (Kwon ve diğ., 2020). Bu durumun, çözme süresinde artış neticesinde DÖÇ çeşitlerinin daha fazla miktarda çözünen maddeyi çözme imkânı bulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3. GIDA SANAYISİNDE DERİN ÖTEKTİK ÇÖZÜCÜLERİN KULLANIM OLANAKLARI

Gıda endüstrisi belirli bir çerçeve içinde değerlendirilmesi oldukça güçtür. Çünkü, gıda endüstrisi birçok alt sektörleri bünyesinde barındırmaktadır. Bu amaçla gıda endüstrisinin sınırlarını belirlemede the economics of food, farming, natural resources and rural Amerika'nın tanımlaması kullanılmıştır. Bu tanımlamaya göre alt sektörler şu şekilde belirlenmiştir.

- Yağ Ürünleri Sektörü
- Meyve ve Sebze Ürünleri Sektörü
- Süt ve Süt Ürünleri Sektörü
- Alkollü İçecekler Sektörü
- Diyetetik Ürünler Sektörü
- Et ve Et Ürünleri Sektörü
- Gıda Laboratuvar Analizleri Sektörü

1.1. Yağ ürünleri sektörü

Derin ötektik çözücüler yağ ürünleri sektöründe farklı şekillerde kullanım olanağına sahiptirler. Bunlardan en önemli olanı, yağlı tohumlardaki yağın ekstrakte edilmesi işlemidir. Ekstraksiyon işleminde klasik çözücü çeşitleri kullanılmaktadır. Ancak bu çözücülerin geri kazanım oranı her döngüde azalmaktadır. Bundan dolayı her döngüde bu çözücüler doğaya daha fazla yayılmakta, bu da çevrenin ve doğal yaşamın zarar görmesine sebebiyet vermektedir. Klasik çözücüler yerine DÖÇ çeşitlerinin ekstraksiyonda kullanılmaları bu zararın oluşmasını engelleyebilmektedir (Laitinen ve diğ., 2017). Liu ve diğ. (2017) susam yağını, Dai ve diğ. (2013) ayçiçek yağını derin ötektik çözücü çeşitlerini kullanarak elde edebilmişler, hatta Dai ve diğ. (2013) DÖÇ çeşidinin yağ ekstraksiyon verimini değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca yağ ekstraksiyonunda DÖÇ çeşitleri kullanılarak, küspedeki besin içeriklerinin zarar görmesinin önlenebileceği belirlenmiştir (Procentese ve diğ., 2018). Başka bir çalışmada, palm yağı küspesindeki şeker içerik DÖÇ (kolin klorür: üre, 1:2) kullanılarak elde edilmiştir (Nor ve diğ., 2016). Bu veriler DÖÇ çeşitlerinin klasik çözücü çeşitleri yerine yağ endüstrisindeki ekstraksiyon proses basamağında kullanılabileceğini göstermektedir.

Çeşitli nedenlerden yağ ürünlerinde istenilmeyen maddeler bulunabilmekte veya oluşabilmektedir. İstenilmeyen maddeler yağ ürünlerinde kaliteyi olumsuz etkilemekte ve toksik etki gösterebilmektedirler. Bun-

dan dolayı bu maddeler insan sağlığını için tehdit oluşturmaktadırlar. Bu maddelerin yağ ürünlerinden uzaklaştırılmasında rafinasyon işlemi uygulanmaktadır (Yemişçioglu ve diğ., 2013). Ancak kullanılan kimyasal maddeler rafinasyon işleminden sonra geri kazanılamamakta, atık olarak doğaya ve çevreye zarar vermektedirler. Karimi ve diğ. (2015) farklı DÖÇ çeşitleriyle (kolin klorür: üre; 1:2, kolin klorür: oksalik asit; 1:2 ve kolin klorür: etilen glikol; 1:2) çeşitli bitkisel yağlarda (mısır, susam, ayçiçeği, zeytin) bulunan ağır metalleri yağdan ayırabilmişler, bu işlemde en etkin olan DÖÇ çeşidinin kolin klorür: üre olduğunu açıklamışlardır. Bu alanda yapılacak yeni çalışmalarla, klasik çözücülerin yağ rafinasyonunda kullanımlarının sınırlandırılabilceği düşünülmektedir.

Yağ atıklarında biyoaktif içeriği yüksek çeşitli maddeler bulunabilmektedir. Bu maddeler kazanılarak, gıda ürünlerinin tüketimi neticesinde oluşan gıda atık miktarını azaltılabilir ve hatta enerji tasarrufu sağlanabilir, böylece doğanın ve çevrenin daha az zarar görmesi gerçekleştirilmiş olur. Bazı bitkisel yağlarda serbest radikallere karşı hücreyi korumada güçlü antioksidan aktivite gösterebilen Tokoferol ve tokotrienol biyoaktif içeriği yüksek maddelerdir. Bu özellikleri sayesinde kanser ve timör riskini azaltıcı etkiye sahiplerdir (Sen ve diğ., 2007). Hadi ve diğ. (2015) palm yağından, Wei ve diğ. (2019) soya fasulyesi yağından tokoferol ve tokotrienol içeriği DÖÇ kullanarak kazanabilmişlerdir.

Yağ ürünlerinde bulunan fenolik bileşikler ve flavonoidler antimikrobiyal, antioksidatif ve antiinflamatuvar etkiye sahip olup, insan sağlığına olumlu etki göstermektedirler. Atık yağdaki bu maddeler klasik çözücüler kullanılarak kazanılabilmektedir (Bayaz, 2016). Paradiso ve diğ. (2016) ile Garcia ve diğ. (2016) zeytin yağındaki, Dai ve diğ. (2015) aspir yağındaki, Liu ve diğ. (2019) susam yağındaki, Hadi ve diğ. (2015) palm yağındaki, Liu ve diğ. (2019) soya yağındaki fenolik maddeleri farklı DÖÇ çeşitlerini kullanarak kazanabilmişlerdir. Ayrıca küspe yağ endüstrisinde elde edilen yan ürün olarak değerlendirilmektedir. Bu üründe bulunan proteinlerin Grundniewska ve diğ. (2018) çalışmasında DÖÇ (gliserol-kolin klorür) kullanılarak kazanılması mümkün olmuştur. Bu çalışmalar yağ endüstrisinin atık ürünlerinde bulunabilecek biyoaktif maddelerin DÖÇ kullanılarak kazanılabilecekleri, böylece yağ endüstrisinde oluşan atık miktarının azaltılabileceğini göstermektedirler.

Serbest yağ asitleri yağ ürünlerinde trigliserit yapıya bağlı olmayan, serbest halde bulunan yağ asitlerini ifade etmektedir. Yağ ürünlerinde serbest yağ miktarı arttıkça oksidasyon daha hızlı gerçekleşmektedir. Bozulan yağ tüketilemeyeceğinden atık olarak değerlendirilmektedir (Can, 2019). Ancak Zhang ve diğ. (2020) sebze yağında bulunan serbest yağ asitlerini DÖÇ kullanarak gliseritlere dönüştürerek biodizel yakıt üretebilmiş, böylece atık miktarının azaltılabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca

üretilen biodizel yakıt kalitesinin DÖÇ çeşidine, DÖÇ bileşenlerinin molar oranlarına ve DÖÇ ile muamele süresine göre değişebileceği Literatürde açıklanmaktadır. (Hayyan ve diğ., 2022).

1.2. Meyve ve Sebze Ürünleri Sektörü

Meyve sebze ürünleri biyoaktif içerik bakımından zengin besin kaynaklarıdır. Farklı DÖÇ kullanılarak meyve sebze ürünlerinde bulunan fenolik bileşenlerin kazanılabileceği bulunmuştur (Bubalo ve diğ., (2016) üzümünden flavonoidleri; Debetic ve diğ. (2020) üzüm çekirdeğinden polifenol içeriği, Bajkacz ve Adamek (2017) soya ürününden izoflavon içeriği, Jeong ve diğ. (2017) yeşil çaydan kateşini). Hatta Bogaars ve diğ. (2015) DÖÇ çeşitlerinin klasik çözücülere göre portakal atığındaki biyoaktif içeriğin kazanımında daha verimli biçimde kullanabilmişlerdir. Bu da DÖÇ çeşitlerinin klasik çözücülerin alternatifi olarak değerlendirileceklerinin kanıtıdır. Ancak çalışmalarda DÖÇ çeşidine göre meyve sebze atıklarından elde edilen biyoaktif madde kazanımına değişimlerin olduğu (Bubalo ve diğ., 2016; Radosevic ve diğ., 2016), hatta kazanımda hedeflenen maddeye (flavonoid, fenolik bileşik gibi) göre bile DÖÇ çeşitlerinin etkinliklerinin değiştiği tespit edilmiştir (Radosevic ve diğ., 2016). Bu durumun çözünme kinetiğiyle etkili olduğu, DÖÇ veriminde bileşen çeşitlerinin, bileşenlerin molar oranlarının ve su ilave edilme miktarının etkili olduğu düşünülmektedir (Abbott ve diğ., 2007; Van der Bruinhorst ve diğ., 2016). Van der Bruinhorst ve diğ. (2016) DÖÇ oluşumunda %10-30 su ilavesinin meyve atığından (portakal kabuğu) biyoaktif madde kazanımını arttırdığını, Gomez-Urios ve diğ. (2022) portakal kabuğu atığı kazanımında DÖÇ bileşenlerinin molar dengesinin ve kullanılan DÖÇ miktarının verimi değiştirdiğini açıklamışlardır.

1.3. Süt ve süt ürünleri sektörü

Süt ve süt ürünleri fabrikaları gıda endüstrisinde en fazla atık suyun oluşturulduğu sanayi kuruluşlarıdır. Süt fabrikalarında üretim faaliyetleri sırasında oluşan atık suda bol miktarda yağlı maddeler bulunmakta, bu maddeler atık su arıtma sistemlerinde ve kanalizasyon alt yapısında çeşitli sorunlara sebebiyet vermektedirler. Ayrıca bu atık suda bazı değerli besin maddeleri (laktoglobulin, süt yağı, immünoglobulin gibi) de bulunabilmektedir (Helkan ve diğ., 2016). Süt fabrikalarında ortaya çıkan atık su probleminin çözülmesinde ve bu suyun içinde bulunan biyoaktif içeriklerin kazanımında DÖÇ kullanımı araştırma konusu olmuştur. Seresh-ti ve diğ. (2020) DÖÇ kullanarak atık suda bulunan süt yağını ayırmayı başaramışlardır. Ayrıca istenilen maddeyi elde etmede DÖÇ hacminin etkili olduğu, hacmin 100 µL altı olan DÖÇ ilavesinin süt yağının kazanımında etkili olmadığını vurgulamışlardır. Bu bakıma Seresh-ti ve diğ.

(2020) çalışması önem arz etmekte olup, ilk kez DÖÇ hacminin de DÖÇ verimini etkilediği bahsedilmiştir. Li ve diğ. (2016) sütte bulunan kloromycetin ve tiamfenikol maddelerini DÖÇ kullanarak yaklaşık %80 oranla kazanabilmişlerdir. Bu veri atık süt ürünlerinde bulunan biyoaktif içeriğin DÖÇ çeşitleri kullanılarak kazanılabileceğini, böylece daha az atık oluşturulacağını kanıtlamaktadır.

Bebek mamaları gıda güvenlik kurallarının en üst noktada tutularak üretilen besin maddeleridir. Bebek mamalarının formülasyonlarında süt veya süt tozu bulunmaktadır. Süt veya süt tozunda kalabilecek çinko kalıntısı, bebek mamasını tüketen bebeklerde ciddi rahatsızlıklara ve hatta ölümlerine sebebiyet verebilmektedir (Gökçay ve diğ., 2012). Kurt ve diğ. (2020) oksalik asit bazlı DÖÇ çeşitleriyle bebek mamalarında bulunabilecek çinko kalıntılarını ayırmayı başaramışlardır. Bu da sağlıklı gıda tüketiminde de DÖÇ çeşitlerinin kullanılabilirliğini kanıtlar niteliktedir.

1.4. Alkollü içecekler sektörü

Alkollü içeceklerin üretimleri boyunca sayısız yan ürünler oluşabilmektedir. Bu yan ürünler gıda takviyesi, ilaç, kozmetik gibi sanayi dallarında hammadde olarak değerlendirilerek, ticari değeri yüksek üretimde kullanılabilir (Mussatto, 2009). Çeşitli çalışmalarda sanayi için yüksek değere sahip biracılık yan ürünlerinin, derin ötektik çözücüler kullanılarak elde edilebileceği açıklanmıştır. Çeşitli DÖÇ çeşitleri kullanılarak Barbosa-Pereira ve diğ. (2013) bira atık suyunda bulunan değerli maddeleri (gallik asit, kateşin, 4-hidroksibenzoik asit, kafeik asit, kuersetin gibi), Bosiljkov ve diğ. (2017) şarap tortusunda bulunan antosiyaninleri kazanmışlardır. DÖÇ çeşitleri alkollü içecek sektöründe değerli maddelerin kazanımları dışında proses optimizasyonunda da kullanılabileceği ifade edilmiştir (Chanquia ve diğ., 2020). Chanquia ve diğ. (2020) alkollü içeceklerin üretiminde DÖÇ kullanılmasıyla, üretim sonunda oluşan atık su miktarında azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu da DÖÇ çeşitlerinin gıda sanayisinde farklı şekillerde kullanım imkanının bulunduğunu kanıtlamaktadır.

1.5. Diyetetik Ürünler Teknolojisi

Diyet lifleri, bitkisel besinlerin hazmedilmesi mümkün olmayan kısımlarıdır. Sindirim sisteminde su absorbe ederek dışkı yapımını kolaylaştırmaktadırlar. Bitkisel besinlerde çeşitli diyet lifi özelliğine sahip besin maddeleri (selüloz, dekstrin, inülin, pektinler, betaglukanlar gibi) bulunmaktadır (Dülger ve Şahan, 2011). Yapılan çalışmalarda besinlerde bulunan diyet lif çeşitlerinin DÖÇ yardımıyla kazanılabileceği (Francisco ve diğ., 2012; Kroon ve diğ., 2013), kolin klorür'lü DÖÇ çeşitlerinin diğer DÖÇ çeşitlerine göre bu kazanımda daha etkili oldukları açıklanmıştır.

(Jablonsky ve diğ., 2015; Grande, 2014; Lynam ve diğ., 2017; Kumar ve diğ., 2016). Hatta Kumar ve diğ., (2016) farklı DÖÇ çeşitlerini kullanarak çeşitli diyet lif çeşitlerini (lignin, selüloz, ksilen) kazanmaya çalışmışlar, kolin klorür'lü DÖÇ çeşitleriyle nerdeyse %100 oranında kazanım sağlayabilmişlerdir. Kolin klorür'lü DÖÇ çeşitlerinin diyet liflerinin kazanımında sergiledikleri yüksek verimliliği Lynam ve diğ. (2017) da gözlemlenmiştir. Kolin klorür'ün diyet liflerinin kazanımdaki rolü hakkında ayrıntılı bilgi henüz bilimsel literatürde açıklanmamıştır.

1.6. Et ve Et Ürünleri Sektörü

Et ve et ürünleri sektöründe üretim süreci sonunda çeşitli atık ürünler oluşabilmektedir. Bunlar hayvanın kafası, kemikleri, kanı, yağı gibi yapılar olup, atık olarak değerlendirilmelerine karşın yapılarında değerli içerikler bulundurmaktadırlar. Bu içerikler kozmetik, ilaç, enzim teknolojisi gibi alanlarda kullanılma imkânları bulunmaktadır (Aspevik ve diğ., 2017). Bai ve diğ. (2017) farklı DÖÇ çeşitleri kullanarak hayvan yağında bulunan kollojen peptitlerin kazanımlarını sağlayabilmişlerdir. Ayrıca Bai ve diğ. (2017) kolin klorür'lü DÖÇ çeşitlerinin diğer DÖÇ çeşitlerine göre daha yüksek verimle işlev gördüklerini ifade etmişlerdir. Bu sonuç diyetetik liflerin kazanımında bulunan sonuçlarla paralellik göstermektedir (Jablonsky ve diğ., 2015; Grande, 2014; Lynam ve diğ., 2017; Kumar ve diğ., 2016). Benzer sonuçlar hayvan kanından serum albüminin kazanılmasını inceleyen çalışmaların sonuçlarında da gözlemlenmiştir. Zeng ve diğ. (2014) hayvan kanındaki serum albüminleri kolin klorür'lü DÖÇ çeşitleriyle %100'e varan oranda kazanım sağlayabilmelerine karşın çeşitli çalışmalarda hayvan kanındaki serum albüminleri kolin klorür'süz DÖÇ çeşitleriyle ancak %90 seviyelerinde kazanım yapılmıştır (Antalik ve Parnica, 2014; Li ve diğ., 2016; Xu ve diğ., 2015). Çalışmalarda gözlemlenen farklılığın kolin klorür'ün gıda atıklarında bulunan değerli maddelerin kazanımındaki etkinliğini göstermektedir. Ayrıca hayvan kanındaki albüminlerin kazanımında DÖÇ çeşitlerinin verimleri su ilavesi (susuz DÖÇ: 30 mgmL⁻¹, su ilaveli DÖÇ: 235 mgmL⁻¹) (Choi ve diğ., 2011) ve tuz ilavesi durumlarına (0.9 gmL⁻¹'den fazla tuz ilavesi verimi düşürmüştür) (Xu ve diğ., 2015) göre de değiştiği rapor edilmiştir.

Et ve et ürünleri yapılarında çeşitli besin içeriklerini taşımaktadırlar. Bu önemli besin içeriklerinin kazanımı hem zahmetli bir süreç olup hem de geri dönüşümü mümkün olmayan kimyasalların kullanılmasını gerektirmektedir. Ancak çalışmalarda bu besin içeriklerinin derin ötektik çözücülerle kazanılabilecekleri açıklanmıştır. Farklı DÖÇ çeşitleri kullanılarak et ürününde bulunan florokinolon içeriğin (Timofeeva ve diğ., 2020), tavuk etinde bulunan sülfonamid içeriğin (Shishov, 2020) ve morina bağından kollagen peptit içeriğin (Bai ve diğ., 2017) kazanımı sağlana-

bilmiştir. Ancak DÖÇ çeşitlerindeki bileşenlerin molar oranlarının ve su ilave edilmesinin, et ve et ürünlerinde bulunan önemli besin içeriklerinin kazanımına olan etkileri incelenmemiştir.

1.7. Gıda Laboratuvar Analizleri Sektörü

Klasik çözücüler çeşitli gıda analizlerinde hala kullanılmaktadırlar. Analizlerin neticesinde kullanılan bu çözücüler tekrar kullanılamayacaklarından atık olarak değerlendirilmekte, bu da doğayı ve çevreyi olumsuz etkilemektedir (Puranik ve diğ., 2009). Derin ötektik çözücülerin organik veya inorganik maddelerin kazanılmasında veya ekstrakte edilmesinde kullanılabileceği ifade edilmektedir. Ancak DÖÇ çeşitlerinin verimi ve ayrıştırılan/ekstrakte edilen maddenin miktarı çeşitli etmenlerden etkilenileceği de unutulmamalıdır. (Murador ve diğ., 2019). Bu yüzden DÖÇ çeşitlerinin gıda analizlerinde kullanım şartlarının tespit edilmesi çeşitli çalışmalarda araştırma konusu olmaktadır.

Yağ ürünleri değişik nedenlerden dolayı hızla bozulabilmektedirler. Yağ ürünlerinin bozulmasının geciktirilebilmesi için yağ ürünlerine sentetik antioksidan içerik eklenebilmektedir. Ancak gıda kodeksine göre yağ ürünlerine eklenebilir sentetik antioksidan içeriğin belli bir limit bulunmaktadır (Büyükyılmaz ve Keçeli, 2018). Bundan dolayı yağ ürünlerine eklenen sentetik antioksidan içeriğin tespiti için gıda analizi yapılmaktadır. Liu ve diğ. (2017) ve Çabuk ve diğ. (2019) farklı DÖÇ çeşitlerini kullanarak yağ ürünlerinde bulunan sentetik antioksidan içeriği tespit edebilmişlerdir. Sentetik antioksidan içerik dışında, yağ ürünlerinin yapısında doğal antioksidan maddeler de bulunabilmektedir, bu maddelerin tespitinde DÖÇ çeşitlerinin kullanılabilecekleri ifade edilmektedir. Liu ve diğ. (2017) susam yağında bulunan sesamol ‘ü kolin klorür’lü DÖÇ çeşitleriyle kazanımını sağlayabilmişler, hatta DÖÇ çeşitlerinin klasik çözücülere göre daha yüksek verimle sesamol kazanımını gerçekleştirebildiğini açıklamışlardır.

Gıda ürünlerinde çeşitli fenolik maddeler bulunmaktadır. Bu fenolik maddeler sahip oldukları özelliklerden dolayı araştırma konusu olmaktadır. Fenolik madde analizlerinde klasik çözücüler kullanılmaktadır. Ancak gıda maddelerinde bulunan fenolik maddelerin DÖÇ çeşitleri kullanılarak ayrıştırılabileceği açıklanmıştır. Khezeli ve diğ. (2016) değişik bitkisel yağ çeşitlerindeki (zeytin, badem, tarçın ve susam) farklı fenolik madde içeriğini (ferulik, kafeik ve sinnamik) kolin klorür’lü DÖÇ çeşitleriyle ekstrakte edebilmişlerdir. El Kantar ve diğ. (2019) greyfurt kabuğundaki, Bubalo ve diğ. (2016) üzüm kabuğundaki, Panic ve diğ. (2019) üzüm ve zeytin posasındaki fenolik maddeleri farklı DÖÇ çeşitleriyle kazanım sağlayabilmişlerdir. Ayrıca Garcia ve diğ. (2016) çalışmalarında DÖÇ çeşitlerinin gıda maddesindeki fenolik maddeleri klasik çözücülere göre

daha iyi ekstrakte ettiğini açıklamışlardır. Çalışmalarda bulunan bu sonuçlar DÖÇ çeşitlerinin fenolik madde analizinde klasik çözücülerin yerine kullanılabileceklerini göstermektedirler.

Gıda maddelerinde istenilerek katılmadığı halde üretim, işleme, hazırlama, depolama, ambalajlama ve taşıma gibi değişik proses basamaklarında gıda maddesine bulaşan çeşitli kimyasal maddeler bulunmaktadır. Bu maddelerin (boya, herbisitler, çeşitli toksinler) tespitinde ve gıda maddelerinden ayrıştırılmalarında kullanılan yöntemler çevre kirliliğine sebebiyet vermektedir. Ancak DÖÇ çeşitleri kullanılarak Arcon ve diğ. (2020) çeşitli zehirli renk maddelerinin, Ravandi ve diğ. (2018) çeşitli gıda örneklerinde bulunan zehirli renk maddelerinin, Faraji ve diğ. (2019) farklı gıda örneklerinde bulunan çeşitli boya maddelerinin; Wang ve diğ. (2019) yemeklik yağda bulunan 4 çeşit herbisitlerin, Wu ve diğ. (2019) farklı ekin ürünlerinde bulunan aflatoksinin ve Torbati ve diğ. (2018) içme suyunda bulunan tehlikeli kimyasal maddelerin (aromatik aminler) tespitlerini veya ayrıştırılmalarını yapabilmışlerdir.

Gıda sanayisinde sayısız ürün çeşidinde son zamanlarda taklit ve taşış sıkça rastlanılmaktadır. Gıda analiz yöntemleriyle gıda maddelerindeki taklit ve taşış tespit edilebilmektedir. Ancak bu analizlerde insan ve çevre sağlığına zararlı kimyasal maddelerin tüketimi gerçekleştirilmektedir. Derin ötektik çözücüler kullanılarak gıda ürünlerindeki taklit ve taşış'ın tespit edilebileceği açıklanmıştır. Wang ve diğ. (2017) gıda maddelerine katılması yasaklı olan rodamin B maddesini, Liu ve diğ. (2019) özellikle baharatlara katılan Sudan 1 boyasını DÖÇ ile gıdayı ekstrakte ederek ayırıştırabilmiş, böylece gıdada gerçekleştirilen taklit ve taşış olayını tespit edebilmişlerdir.

SONUÇ

Yeşil kimya kavramı doğayı, canlıları ve insan sağlığını korumak için gerekli esasları açıklamaktadır. Derin ötektik çözücüler toksik olmamaları ve geri dönüşümlerinin mümkün olmaları gibi özellikleri sayesinde yeşil kimya için belirlenen kurallara uymaktadır. Bu da DÖÇ çeşitlerini çoğu araştırmanın konusu yapmaktadır. Bu çalışmada gıda endüstrisinde DÖÇ çeşitlerinin kullanım olanakları değerlendirilmiş, birçok gıda sanayi dalında DÖÇ çeşitlerinin kullanılabilirliği açıklanmıştır. Ancak DÖÇ çeşitlerinin sahip oldukları özelliklerinin tanımlanması tam olarak yapılmamış olup, hala bu süreç devam etmektedir. DÖÇ'in bugüne kadar tüm bilinmeyen özelliklerinin tanımlanmasıyla, gıda endüstrisinde kullanılma olanaklarının yakın gelecekte artabileceği düşünülmektedir.

REFERANSLAR

- Abbott A. P., Boothby D., Capper G., Davies D. L. ve Rasheed R. K. (2004). Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: Versatile alternatives to ionic liquids. *J. Am. Chem. Soc.* 126, 9142–9147.
- Abbott A.P.; Capper G. ve Gray S. (2006). Design of improved deep eutectic solvents using hole theory. *ChemPhysChem* 7, 803–806.
- Abbott A. P., Harris R. C. ve Ryder K. S. (2007). Application of hole theory to define ionic liquids by their transport properties. *J. Phys. Chem. B.* 111, 4910–4913.
- Anasta, P.T. ve Warner, J.C. (1998). Green Chemistry: Theory and Practice. *Oxford University Press*, New York.
- Arcon D. P., Francisco C. ve Franco J. (2020). All-fatty acid hydrophobic deep eutectic solvents towards a simple and efficient microextraction method of toxic industrial dyes. *J of Molecular Liquids.* 318. 114220.
- Bai, C., Wei, Q., Ren, X., 2017. Selective extraction of collagen peptides with High purity from cod skins by deep eutectic solvents (DESs). *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5 (8), 7220–7227.
- Bajkacz S. ve Adamek J. (2017). Evaluation of new natural deep eutectic solvents for the extraction of isoflavones from soy products. *Talanta.* 168. 329- 335.
- Barbosa-Pereira L., Pocheville A., Angulo I., Paseiro-Losada P. ve Cruz J. M. (2013). Fractionation and purification of bioactive compounds obtained from a brewery waste stream. *Biomed. Res. Int.* 1–11.
- Bubalo M. C., Curko N., Tomasevic M., Ganic K. K. ve Redovnikovic I. R. (2016). Green extraction of grape skin phenolics by using deep eutectic solvents. *Food Chem.* 200, 159–166.
- Büyükyılmaz N. ve Keçeli T. M. (2018). Sentetik antioksidanların bitkisel yağların oksidatif ve termalstabilitesine etkisinin belirlenmesi. *Ç. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi.* 36 (2). 61- 70.
- Bosiljkov T., Dujmic F., Bubalo M. C., Hribar J., Vidrih R., Brncic M., Zlatic E., Redovnikovic I. R. ve Jokic S. (2017). **Natural deep eutectic solvents and ultrasound-assisted extraction: green approaches for extraction of wine lees anthocyanins.** *Food Bioprod Process.* 102. 195-203.
- Bubalo M.C., Ćurko N., Tomašević M., Ganić K.K. ve Redovniković I.R. (2016). Green extraction of grape skin phenolics by using deep eutectic solvents. *Food Chem.* 200, 159–166.
- Bogaars R.A. (2015). Exploring Commercial Applications of Natural Deep Eutectic Solvents. Master Thesis. TU Delft pp. 78.
- Bayaz M. (2016). Natürel zeytinyağlarındaki fenolik bileşiklerin biyolojik aktivitesi. *Akademik Gıda.* 14 (4). 441- 450.

- Can N. (2019). Bitkisel yağların muhafazasında oksidatif stabilitenin önemi ve oksidatif stabilitenin belirlenmesinde kullanılan analiz yöntemleri. *ABM-YO Dergisi*. 54. 107- 124.
- Chanquia S. N., Huang L., Linares G. G., Maria P. D. ve Kara S. (2020). Deep eutectic solvents as smart cosubstrate in alcohol dehydrogenase-catalyzed reductions. *Catalysts*. 10. 1013.
- Cui Q., Peng X., Yao X. H., Wei Z. F., Luo M., Wang W., Zhao C. J., Fu Y. J. ve Zu Y. G. (2015). Deep eutectic solvent-based microwave-assisted extraction of genistin, genistein and apigenin from pigeon pea roots. *Separation and Purification Technology*. 150. 63–72.
- Çabuk H., Yılmaz Y. ve Yıldız E. (2019). A vortex-assisted deep eutectic solvent-based liquid- liquid microextraction for the analysis of alkyl gallates in vegetable oils. *Acta Chim. Slov*. 66, 385–394.
- Dabetic N., Todorovic V., Panic M., Ivana R. R. ve Sladjana S. (2020). Impact of deep eutectic solvents on extraction of polyphenols from grape seeds and skin. *Appl. Sci*. 10 (14). 4830.
- Dagostino C., Harris R. C., Abbott A. P., Gladden L. F. ve Mantle M. D. (2011). Molecular Motion and Ion Diffusion in Choline Chloride Based Deep Eutectic Solvents Studied by 1 H Pulsed Field Gradient NMR Spectroscopy. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13, 21383-21391.
- Dai Y., Witkamp G. J., Verpoorte R. ve Choi Y. H. (2015). Tailoring Properties of Natural Deep Eutectic Solvents with Water to Facilitate Their Applications. *Food Chemistry*, 187, 14-19.
- Dai Y., van Spronsen J., Witkamp G. J., Verpoorte R., ve Choi Y. H. (2013). Ionic liquids and deep eutectic solvents in natural products research: Mixtures of solids as extraction solvents. *Journal of Natural Products*, 76(11), 2162–2173.
- Desimone J. M. (2002). Practical approaches to green solvents. *Science*. 297 (5582). 799- 803.
- Dülger D. ve Şahan Y. (2011). Diyet lifin özellikleri ve sağlık üzerindeki etkileri. *U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*. 25 (2). 147- 157.
- El Achkar T., Fourmentin S. ve Greige-Gerges H. (2019). Deep eutectic solvents: An overview on their interactions with water and biochemical compounds. *J. Mol. Liq*. 288. 111028.
- El Kantar S., Rajha H. N., Boussetta N., Vorobiev E., Maroun R. G. ve
- Louka N. (2019). Green extraction of polyphenols from grapefruit peels using high voltage electrical discharges, deep eutectic solvents and aqueous glycerol. *Food Chem*. 295, 165–171. Elgharbawy A. A., Hayyan M., Hayyan A., Basirun W. J., Salleh H. M.,
- Mirghani M. E. (2020). A Grand Avenue to Integrate Deep Eutectic Solvents into Biomass Processing. *Biomass and Bioenergy*, 137, 105550.

- Faraji M. (2019). Determination of some red dyes in food samples using a hydrophobic deep eutectic solvent-based vortex assisted dispersive liquid-liquid microextraction coupled with high performance liquid chromatography. *J. Chromatogr. A* 1591, 15–23.
- Florindo C., Oliveira F. S., Rebelo L. P. N., Fernandes A. M. ve Marrucho I. M. (2014). Insights into the synthesis and properties of deep eutectic solvents based on cholinium chloride and carboxylic acids. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2. 2416–2425.
- Garcia A., Rodriguez-Juan E., Rodriguez-Gutierrez G., Rios J. J. ve Fernandez-Bolanos J. (2016). Extraction of phenolic compounds from virgin olive oil by deep eutectic solvents (DESS). *Food Chem.* 197, 554–561.
- Garcia G., Atilhan M. ve Aparicio S. (2015). An approach for the rationalization of melting temperature for deep eutectic solvents from DFT. *Chemical Physics Letters*, 634, 151–155.
- Garcia G., Aparicio S., Ullah R. ve Atilhan M. (2015). Deep Eutectic Solvents: Physicochemical Properties and Gas Separation Applications. *Energy and Fuels*. 29 (4). 2616- 2644.
- Gomez-Urios C., Adriana V. O., Pablo P. C., Daniel L. M., Ana F., Maria J. E. ve Jesus B. (2022). Sustainable development and storage stability of orange by-products extract using natural deep eutectic solvents. *Foods*. 11 (16). 2457.
- Gökçay G., Eren T. ve Devecioğlu E. (2012). Bebek mamalarındaki katkı maddeleri. *Çocuk Dergisi*. 12 (2). 60- 65.
- Grudniewska A., Melo E. M., Chan A., Gnilka R., Boratynski F. ve Matharu A. S. (2018). Enhanced protein extraction from oilseed cakes using glycerol-choline chloride-deep eutectic solvents: A biorefinery approach. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6, 15791–15800.
- Hadi N. A., Ng M., Choo Y., Hashim M. ve Jayakumar N. (2015). Performance of choline- based deep eutectic solvents in the extraction of tocols from crude palm oil. *J. of the American Oil Chemists' Society*. 92 (11).
- Hayyan A., Abed K. M., Hizaddin H. F., Wan M. F. W., Ng Y. S. ve diğ. (2022). Application of natural deep eutectic solvents in bulk liquid membrane system for removal of free glycerol from crude fatty acid methyl ester. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 650. 129449.
- Hsieh Y. H., Li Y., Pan Z., Chen Z., Lu J., Yuan J., Zhu Z. ve Zhang J. (2019). Ultrasonication-assisted synthesis of alcohol-based deep eutectic solvents for extraction of active compounds from ginger. *Ultrasonics Sonochemistry*.
- Jeong M. K., Ko J., Zhao J., Jin Y., Yoo D. E., Han S. Y. ve Lee J. (2017).

Multi-functioning deep eutectic solvents as extraction and storage media for bioactive natural products that are readily applicable to cosmetic products. *J Clean Prod*, 15, 87-95.

Joshi D. R. ve Adhikari N. (2019). An overview on common organic solvents and their toxicity. *J of Phar Research Int*. 28 (3). 1-18.

Karimi M., Dadfarnia S., Shabani A.M.H., Tamaddon F. ve Azadi D. (2015). Deep eutectic liquid organic salt as a new solvent for liquid-phase microextraction and its application in ligandless extraction and preconcentration of lead and cadmium in edible oils. *Talanta*. 144, 648–654.

Khezeli T., Daneshfar A. ve Sahraei R. A. (2016). Green ultrasonic-assisted liquid-liquid microextraction based on deep eutectic solvent for the HPLC-UV determination of ferulic, caffeic and cinnamic acid from olive, almond, sesame and cinnamon oil. *Talanta*. 150, 577–585.

Kurt A., Bağda E. ve Altundağ H. (2020). Development of deep eutectic solvent extraction method for extraction of Zn²⁺ from powdered milk and baby formula samples and its determination by ICP-OES. *Journal of Iranian Chemical Society*. 17 (6). 1-9.

Kwon G. J., Yang B. S., Park C. W., Bandi R., Lee E. A., Park J. S., Han S. Y., Kim N. H., Lee S. H. (2020). Treatment Effects of Choline Chloride-Based Deep Eutectic Solvent on the Chemical Composition of Red Pine (*Pinus densiflora*). *BioResources*, 15, 6457-6470.

Laitinen, O., Suopaja T., Monika O. ve Liimatainen H. (2017). Hydrophobic, superabsorbing aerogels from choline chloride-based deep eutectic solvent pretreated and silylated cellulose nanofibrils for selective oil removal. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 9: 25029–37.

Li J., Han Z., Zou Y. ve Yu B. (2015). Efficient extraction of major catechins in *Camellia sinensis* leaves using green choline chloride-based deep eutectic solvents. *RSC Advances*, 5(114), 93937–93944.

Li G., Zhu T. ve Row K. H. (2016). Deep eutectic solvents for the purification of chloromycetin and thiamphenicol from milk. *Journal of Separation Sci*. 40 (3).

Li G., Yan C., Cao B., Jiang J., Zhao W., Jinfang W. ve Mu T. (2015). Highly efficient I2 capture by simple and low-cost deep eutectic solvents. *Green Chemistry*. 18 (8).

Ling J. K. U., Chan Y. S., Nandong J., Chin S. F. ve Ho B. K. (2020). Formulation of choline chloride/ascorbic acid natural deep eutectic solvent: Characterization, solubilization capacity and antioxidant property. *LWT*. 133, 110096.

Liu W., Zhang K.D., Yang G.L. ve Yu J.J. (2019). A highly efficient microextraction technique based on deep eutectic solvent formed by choline chloride and p-cresol for simultaneous determination of lignans in sesame oils. *Food Chem*. 281, 140–146.

- Liu W., Fu X.L. ve Li Z.Z. (2019). Extraction of tocopherol from soybean oil deodorizer distillate by deep eutectic solvents. *J. Oleo Sci.*, 68, 951–958.
- Liu W., Zhang K., Qin Y. ve Yu J. (2017). A simple and green ultra-sonic-assisted liquid–liquid microextraction technique based on deep eutectic solvents for the HPLC analysis of sesamol in sesame oils. *Analytical Methods*. 9 (28):4184–9.
- Liu W., Zong B. Y., Wang X. P., Cai J. L. ve Yu J. J. (2019). A highly efficient vortex-assisted liquid-liquid microextraction based on natural deep eutectic solvent for the determination of Sudan I in food samples. *RSC Adv.* 9, 17432–17439.
- Liu X., Fu N., Zhang Q., Cai S., Wang Q., Han D. ve Tang B. (2019). Green tailoring with water of choline chloride deep eutectic solvents for the extraction of polyphenols from palm samples. *J. Chromatogr. Sci.* 57, 272–278.
- Ljardar S. P., Singh V. ve Gardas R. L. (2022). Revisiting the physicochemical properties and applications of deep eutectic solvents. *Molecules*. 27 (4). 1368.
- Makos P., Przyjazny A. ve Boczkaj G. (2018). Hydrophobic deep eutectic solvents as “green” extraction media for polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous samples. *J. Chromatogr. A* 1570, 28–37.
- Massoud M.A., Fayad R., El-Fadel M. ve Kamleh R. (2010). Drivers, barriers and incentives to implementing environmental management systems in the food industry: a case of Lebanon. *J. Clean. Prod.* 18 (3), 200–209.
- Maugeri Z. ve de María P.D. (2012). Novel choline-chloride-based deep-eutectic-solvents with renewable hydrogen bond donors: Levulinic acid and sugar-based polyols. *RSC Adv.* 2, 421–425.
- Meneses L.; Santos F.; Gameiro A.R.; Paiva A.; Duarte A.R.C. (2019). Preparation of binary and ternary deep eutectic systems. *J. Vis. Exp.* 152.
- Murador D. C., Mesquita L. M. D., Vannuchi N., Braga A. R. C. ve Rosso V. V. (2019). Bioavailability and biological effects of bioactive compounds extracted with natural deep eutectic solvents and ionic liquids: Advantages over conventional organic solvents. *Curr. Opin. Food. Sci.* 26, 25–34.
- New E. K., Wu T. Y., Tien L. L., Poon Z. Y., Loow Y. L., Wei F., Procentese A., Siow L. F., Teoh W. H., Nik D. N. N., Jahim J. M. ve Mohammad A. W. (2019). Potential use of pure and diluted choline chloride-based deep eutectic solvent in delignification of oil palm fronds. *Process Safety and Environmental Protection*, 123, 190–198.
- Nor N.A.M., Mustapha W.A.W. ve Hassan O. (2016). Deep eutectic solvent (DES) as a pretreatment for oil palm empty fruit bunch (OPEFB) in sugar production. *Procedia Chem.* 18, 147–154.

- Pan M., Zhao G., Ding C., Wu B., Lian Z. ve Lian H. (2017). Physicochemical Transformation of Rice Straw after Pretreatment with a Deep Eutectic Solvent of Choline Chloride/Urea. *Carbohydrate Polymers*, 176, 307-314.
- Panic M., Stojkovic M. R., Kraljic K., Skevin D., Redovnikovic I. R., Srcek V. G. ve Radošević K. (2019). Ready-to-use green polyphenolic extracts from food by-products. *Food Chem.* 283, 628–636.
- Paradiso V. M., Clemente A., Summo C., Pasqualone A. ve Caponio F. (2016). **Towards green analysis of virgin olive oil phenolic compounds: extraction by a natural deep eutectic solvent and direct spectrophotometric detection.** *Food Chem*, 212. 43-47.
- Procentese A., Johnson E., Orr V., Campanile A.G., Wood J.A., Marzocchella A. ve Rehmann L. (2015). Deep Eutectic Solvent Pretreatment and Subsequent Saccharification of Corn cob. *Bioresources Technology*, 192, 31-36.
- Puranik S. B., Sanjay P. P. N. ve Rao G. K. (2009). Determination of organic volatile impurities in herbal formulations and extracts by capillary gas chromatography. *Pharmacogn. Mag.* 5, 139–144.
- Radošević K., Ćurko N., Srček V.G., Bubalo M.C., Tomašević M., Ganić K.K. ve Redovniković I.R. (2016). Natural deep eutectic solvents as beneficial extractants for enhancement of plant extracts bioactivity. *Food Sci. Technol.* 73, 45–51.
- Ravandi M. G. ve Fathi M. R. (2018) Green effervescence assisted dispersive liquid-liquid microextraction based on a hydrophobic deep eutectic solvent for determination of Sunset Yellow and Brilliant Blue FCF in food samples. *New J. Chem.* 42, 14901–14908.
- Sen C., Khanna S. ve Roy S. (2007). Tocotrienols in health and disease: the other half of the natural vitamin E family. *Mol. Aspects Med.* 28, 692–728.
- Sereshti H., Jazani S. S., Nouri N. ve Shams G. (2020). Dispersive liquid-liquid microextraction based on hydrophobic deep eutectic solvents: Application for tetracyclines monitoring in milk. *Microchemical Journal*. 158. 105269.
- Shahbaz K., Baroutian S., Mjalli F. S., Hashim M. A. ve AlNashef I. M. (2012). Densities of Ammonium and Phosphonium Based Deep Eutectic Solvents: Prediction Using Artificial Intelligence and Group Contribution Techniques. *Thermochimica Acta*, 527, 59-66.
- Shen X. J., Wen J. L., Mei Q. Q., Chen X., Sun D., Yuan T. Q. ve Sun R. C. (2019). Facile Fractionation of Lignocelluloses by Biomass-Derived Deep Eutectic Solvent (DES) Pretreatment for Cellulose Enzymatic Hydrolysis and Lignin Valorization. *Green Chemistry*, 21, 275-283.
- Shishov A., Gorbunov A., Baranovskii E. ve Bulatov A. (2020). Microextraction of sulfonamides from chicken meat samples in three-component deep eutectic solvent. *Microchemical Journal*. 158. 105274.

- Smith, E. L., Abbott, A.P., ve Ryder, K.S. (2014). Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chem. Rev.*, 114, 11060-11082.
- Söğüt Ö. ve Çelebi B. (2020). Daha Temiz Analizler: Yeşil Kimya, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8. Cilt 1. Sayı, 160-175.
- Timofeeva I., Kira S., Andrey S., Lawrence N., Leonid S. ve Andrey B. (2020). Fluoroquinolones extraction from meat samples based on deep eutectic solvent formation. *Journal of Food Composition and Analysis*. 93. 103589.
- Torbati M., Mohebbi A., Farajzadeh M. A. ve Mogaddam M. R. A. (2018). Simultaneous derivatization and air-assisted liquid-liquid microextraction based on solidification of lighter than water deep eutectic solvent followed by gas chromatography-mass spectrometry: An efficient and rapid method for trace analysis of aromatic amines in aqueous samples. *Anal. Chim. Acta* 1032, 48–55.
- Van den Bruinhorst A., Kouris P., Timmer J.M.K., de Croon M.H.J.M. ve Kroon M.C. (2016). Exploring orange peel treatment with deep eutectic solvents and diluted organic acids. *Nat. Prod. Chem. Res.* 4 (6), 242.
- Xu H., Peng J., Kong Y., Liu Y., Su Z., Li B., Song X., Liu S. ve Tian W. (2020). Key Process Parameters for Deep Eutectic Solvents Pretreatment of Lignocellulosic Biomass Materials: A Review. *Bioresource Technology*, 123416.
- Xu K., Wang Y., Huang Y., Li A. ve Wen Q. (2015). A green deep eutectic solvent-based aqueous two-phase system for protein extracting. *Analytica chimica acta*. 864. 9-20.
- Wang W. D., Du Y. G., Xiao Z. E., Li Y., Li B. F. ve Yang G. W. (2017). Determination of trace rhodamine B in chili oil by deep eutectic solvent extraction and an ultra-high-performance liquid chromatography equipped with a fluorescence detector. *Anal. Sci.* 33, 715–717.
- Wang H.Z., Huang X.D., Qian H., Lu R.H., Zhang S.B., Zhou W.F., Gao H.X. ve Xu, D.H. (2019). Vortex-assisted deep eutectic solvent reversed-phase liquid-liquid microextraction of triazine herbicides in edible vegetable oils. *J. Chromatogr. A*. 1589, 10–17.
- Wu X., Zhang X.X., Yang Y.Q., Liu Y.R. ve Chen X.N. (2019). Development of a deep eutectic solvent-based matrix solid phase dispersion methodology for the determination of aflatoxins in crops. *Food Chem.* 291, 239–244.
- Yadav, A. ve Pandey, S. (2014). Densities and Viscosities of (Choline Chloride+ Urea) Deep Eutectic Solvent and its Aqueous Mixtures in the Temperature Range 293.15 K to 363.15 K. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 59, 2221-2229.
- Yemişçioglu F., Özdikicierler O., Gümüşkesen A. S. ve Sönmez A. E. (2013). Bitkisel yağ rafinasyon atıklarının değerlendirilmesi. *Gıda*. 38 (6). 367- 374.

- Zhang Q., De Oliveira Vigier K., Royer S. ve Jérôme F. (2012). Deep eutectic solvents: Syntheses, properties and applications. *Chem. Soc. Rev.* 41, 7108–7146.
- Zhang T., Shahbaz K. ve Farid M. M. (2020). Glycerolysis of free fatty acid in vegetable oil deodorizer distillate catalyzed by phosphonium-based deep eutectic solvent. *Renewable Energy*. 160. 363-373.
- Zhang L. ve Wang M. (2017). Optimization of deep eutectic solvent-based ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb. *International Journal of Biological Macromolecules*, 95, 675–681.
- Zhou P., Wang X., Liu P., Huang J., Wang C., Pan M. ve Kuang Z. (2018). Enhanced phenolic compounds extraction from *Morus alba* L. leaves by deep eutectic solvents combined with ultrasonic - assisted extraction. *Industrial Crops and Products*, 120, 147–154.

“

BÖLÜM 7

GEOGRİDLERİN KARAYOLU TABAN ZEMİNLERİNİN CBR DEĞERİ ÜZERİNE ETKİSİ

*Erdinç KESKİN¹
İlker ŞAHİNOĞLU²*

”

1 Dr. Öğretim Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, ORCID:0000-0002-8728-2906, erdinckeskin@klu.edu.tr

2 Dr. Öğretim Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, ORCID:0000-0002-2394-6304, ilker.sahinoglu@klu.edu.tr

GİRİŞ

Dünya nüfusunun artışı ile birlikte ulaştırma altyapısına duyulan ihtiyaçlar da her geçen gün artmaktadır. Bu durum yeni karayollarının yapımını ya da mevcut olanların ise rehabilitasyonunu gündeme getirmektedir. Bir karayolu üstyapısı, üzerindeki taşıt yüklerini altyapıya yani taban zeminine aktaran tabakalı (kaplama, temel ve alttemel) bir yapıya sahiptir. Üstyapıyı oluşturan bu tabakalarının kalınlığı ve fonksiyonlarını yerine getirebilmesi ise inşa edildikleri taban zemininin özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Ancak yeni yapılacak bir yolun geçeceği güzergahta her zaman mühendislik açısından elverişli zeminler ile karşılaşılammaktadır. Böyle durumlarda mevcut zemininin çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri (mekanik, katkılar kullanılarak vb.) ile mühendislik açısından elverişli bir malzemeye dönüştürülmesi bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda drenaj, filtrasyon, ayırma, güçlendirme gibi çeşitli amaçlara sahip olan geosentetikler birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılmaktadır (Ziegler, 2017; Zornberg, 2017). Geosentetikler; geotekstil, geogrid, geonet, geomembran ve geokompozit olmak üzere farklı türlerde üretilmektedir (Shukla, 2022). Bunlar içerisinde geogridler sahip oldukları çekme mukavemeti ile yol inşaatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Geogridler genel olarak polyester, yüksek yoğunluklu polipropilen veya yüksek yoğunluklu polietilenden yapılmaktadır (Al-Barqawi ve diğ., 2021).

Literatürde çeşitli geogridlerin kullanımı ile ilgili gerçekleştirilen birçok çalışmaya ulaşılmaktadır (Zhao ve diğ., 1997; Dhule ve diğ., 2011; Kuity ve Roy, 2013; Adams ve diğ., 2015; Sahoo ve Choudhary, 2015; Abu-Farsakh ve diğ., 2016; Adams ve diğ., 2016; Oliver ve diğ., 2016; Zumrawi ve Mansour, 2016; Nair ve Deepthy, 2017; Unni ve diğ., 2017; Suresh ve diğ., 2018; Vishwanath, 2018; Ogunkunbi ve Jimoh, 2019; Jayakumar ve diğ., 2020; Kaur ve Aggarwal, 2020; Kumar ve Tamilarasan, 2020; Roodi ve Zornberg, 2020; Jahandari ve diğ., 2022; Pisini ve diğ., 2022; Susanto ve diğ., 2022). Bu çalışmalardan birkaçı aşağıda özetlenmiştir.

Ahmed Kamel ve diğ. (2004) çalışmalarında tek bir katmanda geogrid ile güçlendirilmiş taban zemininin statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışını araştırmayı amaçlamışlardır. Çalışmada SP, CL ve ML olmak üzere üç farklı zemin ve iki farklı geogrid kullanmışlardır. Geogridleri numune üst yüzeyinden numune yüksekliğinin %20, %40, %60 ve %80 değerlerine denk gelen yerlere yerleştirerek Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneylerini yaş CBR olarak gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca statik üç eksenli ve tekrarlı üç eksenli testleri de yapmışlardır. Sonuç olarak geogrid ile güçlendirmenin CBR ve elastisite modülü değerlerini arttırdığını ve bu

artışın geogridin numune üst yüzeyinden yüksekliğinin %72-%76'sı arasında bir yere konulması ile elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Tabatabaei ve Rahman (2013) yaptıkları çalışmada kaplamasız bir yolda iki farklı geogrid ile yapılacak güçlendirmenin temel tabakası kalınlığında ve maliyetinde meydana gelecek değişimi belirlemeyi amaçlamışlardır. Laboratuvar sonuçlarına göre taban zemininin CH tipi yüksek plastisiteli kil olduğunu ve doymuş durumda CBR değerinin ise %3 olduğu belirlenmiştir. Çalışmada güçlendirme yapmaksızın ve taban zemini yüzeyi ile granüler tabaka arasına iki farklı geogrid yerleştirilerek yol üst-yapı analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarından güçlendirme yapılmaması durumunda gerekli granüler tabaka kalınlığını 480 mm olarak elde ederken geogrid ile yapılan güçlendirme ile bu kalınlığı bir geogrid için 180 mm diğeri için ise 150 mm olarak elde etmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında geosentetik donatı seçeneğinin kullanılmasının sadece gerekli üst-yapı kalınlığını azaltmayacağını bununla birlikte yaptıkları maliyet analiziyle toplam proje maliyetlerinden de önemli ölçüde tasarruf elde edileceğini tespit etmişlerdir.

Akolade ve Olaniyan (2014) çalışmalarında yol inşaatında ıslak koşullar altında geogrid ile güçlendirmenin etkisini araştırmayı hedeflemişlerdir. Bu amaçla üç farklı zemin ile çalışmışlar ve ilk olarak bu zeminlerin sınıflandırılması ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için temel geoteknik laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Geogridleri kalıp tabanından numune yüksekliğinin 2/5, 3/5 ve 4/5'i seviyelerine tek katman olarak yerleştirmişler ve hem katkısız hem de geogridle güçlendirilmiş numunelerin CBR deneylerini yaş CBR olarak gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla sıkıştırdıkları numuneleri 48 saat suda bekletmişlerdir. Üç farklı zemin için %3, %9 ve %6 olarak elde ettikleri yaş CBR değerlerindeki en yüksek artışın geogridin 3/5 seviyesine yerleştirilmesi durumu için sırasıyla %15,1, %14, %12,2 olarak elde edildiğini belirlemişlerdir.

Olaniyan ve Akolade (2014) çalışmalarında değişik bölgelerden aldıkları üç farklı zemin üzerinde geogrid ile güçlendirmenin etkisini araştırmışlardır. Zeminlerin sınıflandırılması ve mühendislik özelliklerinin tespiti için temel deneyleri (elek analizi, kompaksiyon, kıvam limitleri gibi) gerçekleştirmişlerdir. Numune içerisine farklı yüksekliklerde geogrid yerleştirilerek CBR deneyleri yapmışlardır. Sonuç olarak geogrid kullanımı ile taban zeminlerinin dayanımında önemli artışlar elde ettiklerini ve bu nedenle yol inşaatlarında özellikle zayıf taban zeminlerinin bulunduğu bölgelerde geogridlerin kullanılabileceğini ve teşvik edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Rajesh ve diğ. (2016) çalışmalarında iki farklı zemin ve iki farklı geogrid ile hem deneysel hem de alan çalışması gerçekleştirmişlerdir. La-

boratuvarda her iki farklı zemin için geogrid kullanarak hem yaş hem de kuru durumda CBR deneyleri yapmışlar ve geogrid kullanımının CBR değerini arttırdığı sonucunu elde etmişlerdir. Ayrıca arazide örselenmemiş durumda gerçekleştirdikleri CBR deneylerinde laboratuvaradaki sonuçlara göre daha yüksek sonuçlara ulaşmışlardır.

Cuelho ve Perkins (2017) yaptıkları çalışmada farklı türdeki geosentetiklerin aynı koşullar altında yani benzer dayanımdaki taban zemini ve benzer kalınlıktaki temel tabakası için performanslarını ölçmeyi amaçlamışlar ve bunu arazide test kesimi ile gerçekleştirmişlerdir.

Gandhimathi ve Aravind (2019), çalışmalarında zemin iyileştirilmesi amacıyla kireç ve geogridi karşılaştırmışlardır. Öncelikle araziden elde ettikleri zemini sınıflandırmak ve mühendislik özelliklerini belirlemek için temel deneyleri gerçekleştirmişlerdir. CBR değerini %4,38 olarak belirledikleri doğal zeminin kireç ve geogrid ile iyileştirilmesi sonucunda bu değeri sırasıyla %14,6 ve %23,5 olarak bulmuşlardır. Ayrıca üstyapı kalınlığının kireç ve geogrid kullanımı ile sırasıyla %21 ve %37 azaldığını tespit etmişlerdir.

Mittal ve Shukla (2019) çalışmalarında zayıf taban zeminlerinin dayanımı üzerinde geogrid ile güçlendirmenin etkisini incelemişlerdir. Çalışmayı yüksek oranda kil ve silt ihtiva eden zemin üzerinde ve çift yönlü geogrid kullanarak gerçekleştirmişlerdir. CBR ve serbest basınç deney (UCS) numunelerinde geogridi numune içerisinde farklı yükseklikte (H yüksekliğindeki numunenin içerisine üst yüzeyden 0,2H, 0,4H, 0,6H ve 0,8H derinliğe) tek ve iki katman olacak şekilde yerleştirmişlerdir. Güçlendirilmemiş doğal zemin için CBR değerini %3,83, UCS değerini ise 112,09 kN/m² olarak tespit etmişlerdir. CBR değerindeki maksimum artışı, geogridin numune üst yüzeyinden 0,2H derinliğe tek katman, 0,2H ve 0,4H derinlikte çift katman olarak yerleştirilmesi durumları için sırasıyla %36 ve %41 olarak elde etmişlerdir. UCS değerindeki maksimum artışı ise yine geogridin numune üst yüzeyinden 0,2H derinliğe tek katman ve 0,2H ile 0,4H derinlikte çift katman olarak yerleştirilmesi durumları için sırasıyla %62 ve %70 olarak elde etmişlerdir.

Leonardi ve diğ. (2020), çalışmalarında kaplamsız bir yolda tekrarlı yükleme altında geogrid kullanmaksızın ve kullanarak ortaya çıkacak tekerlek izinin değişimini 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli ile incelemişlerdir. Temel tabakası ile taban zemini arasına yerleştirdikleri geogrid ile üstyapı davranışında önemli iyileşmelerin olduğunu ve geogrid kullanımının kalıcı deformasyonları da azaltacağını ifade etmişlerdir.

Wimalasena ve Jayalath (2020) çalışmalarında CBR değeri %3'den küçük olan bir zemin ile granüler tabaka arasına yerleştirdikleri kompozit geogridin tekrarlı yükleme koşulları altındaki etkisini araştırmışlardır.

Deneyi genişliği ve uzunluğu 1m ve yüksekliği 1,2 m olan çelik bir deney kutusunda gerçekleştirmişlerdir. Deney kutusuna taban zeminini 500mm kalınlıkta üzerine gelecek olan granüler tabakayı ise 200mm kalınlıkta yerleştirmişlerdir. İki tabaka arasına yerleştirilen geogrid ile granüler tabakadaki tekerlek izi derinliğinin önemli ölçüde azaldığını ve ayrıca taban zemini üzerine gelen düşey gerilmenin de yaklaşık %25-%30 oranında azaltılabileceği sonucunu elde etmişlerdir.

Aga (2021) çalışmasında yüksek plastisiteli killi bir taban zemininde yerel olarak üretilen polipropilen (PP) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) geogrid kullanılarak CBR değerlerindeki değişimi araştırmıştır. Bu amaçla geogridi CBR kalıbının üst yüzeyinden 35 mm aşağıya yerleştirmiştir. 4 gün suda bekletilen güçlendirilmemiş doğal zemin için yaş CBR değerini %2,98 olarak belirlerken bu değeri PP geogrid ile güçlendirme için %10,16, HDPE geogrid ile güçlendirme için ise %7,48 olarak belirlemiştir.

Sharbaf ve Ghafoori (2021) çalışmalarında esnek bir yol üstyapısında iki eksenli ve üç eksenli olmak üzere iki farklı geogridin kullanımını incelemişlerdir. Deneyleri, silindirik bir düzeneğe içine sırasıyla en üstte sıcak karışım asfalt, altında farklı kalınlıklarda temel tabakası ve taban zemini ile gerçekleştirmişlerdir. İki farklı geogridi temel tabakası içine ve temel tabakası ile taban zemini ara yüzeyine yerleştirilerek toplamda altı farklı deney yapmışlardır. Deneyde yüklemeyi, tekrarlı ve tekerlek yükünü simüle edecek şekilde gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçları ile her iki geogrid kullanımının da temel tabakası-taban zemini ara yüzeyinde oluşan düşey gerilmeleri ve yüzeydeki tekerlek izi derinliğini azalttığını tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada öncelikle araziden elde edilen zeminin temel mühendislik özellikleri laboratuvarında incelenmiştir. Ardından farklı yüksekliklere yerleştirilen farklı çekme mukavemetlerine sahip üç çeşit çift yönlü geogrid ile yaş CBR deneyleri yapılarak dayanım ve şişme değerlerindeki değişim irdelenmiştir.

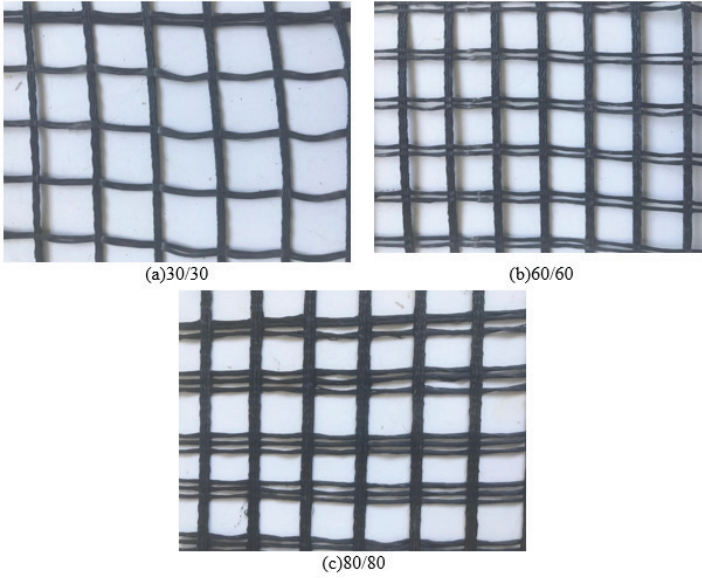
DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER

Çalışmada Kırklareli İl sınırındaki bir araziden temin edilen yüksek plastisiteli killi (CH) bir zemin kullanılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan zemine ait fotoğraf Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan zemin

Deneysel çalışmada farklı çekme mukavemetlerine sahip üç çeşit çift yönlü geogrid kullanılmıştır. Kullanılan geogridlere ait fotoğraf Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan çift yönlü geogridler

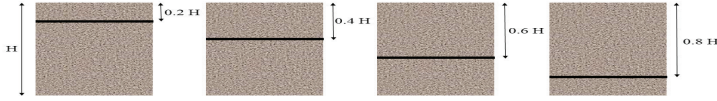
YÖNTEM

Deneyssel çalışmada kullanılan zeminin temel mühendislik özellikleri laboratuvarda ASTM standartlarına göre gerçekleştirilen deneyler ile elde edilmiştir. Bu kapsamda yapılan deneyler ve standartları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada gerçekleştirilen deneyler

Gerçekleştirilen Deney	Deney Standardı
Elek Analizi	ASTM D422
Özgül Ağırlık	ASTM D854
Kıvam Limitleri	ASTM D4318
Kompaksiyon Deneyi	ASTM D1557
CBR (Yaş)	ASTM D1883

Geogridler, CBR değeri üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla zemin numunesi içerisine farklı yüksekliklerde yerleştirilmiştir. Numune içerisine numune yüksekliğine bağlı olarak dört farklı yükseklikte yerleştirilen geogridlerin konumu Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. CBR kalıbına yerleştirilen geogridlerin konumu

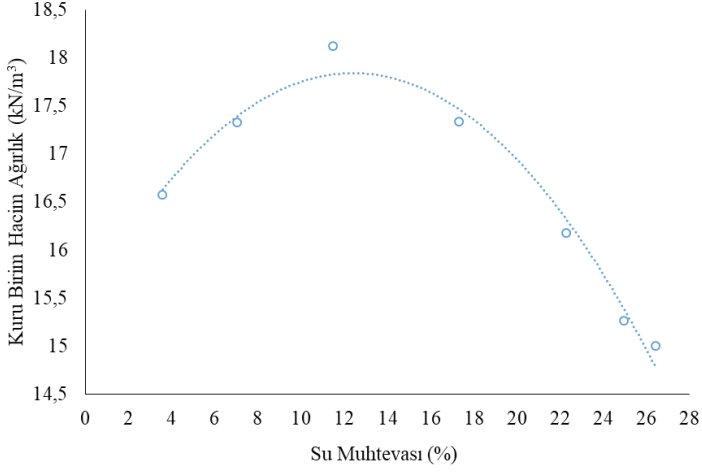
CBR numuneleri kompaksiyon deneyi ile belirlenen optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Geogridler Şekil 3’te verildiği gibi CBR numuneleri içerisine yerleştirilmiş ardından hazırlanan numuneler şişme özellikleri de kaydedilmek üzere dört gün boyunca su tankında bekletilmiştir. Doğal zemin ve farklı yüksekliklere yerleştirilen üç çeşit geogrid ile toplam 13 adet CBR deneyi yapılmıştır.



Şekil 4. CBR kalıbına yerleştirilen geogrid

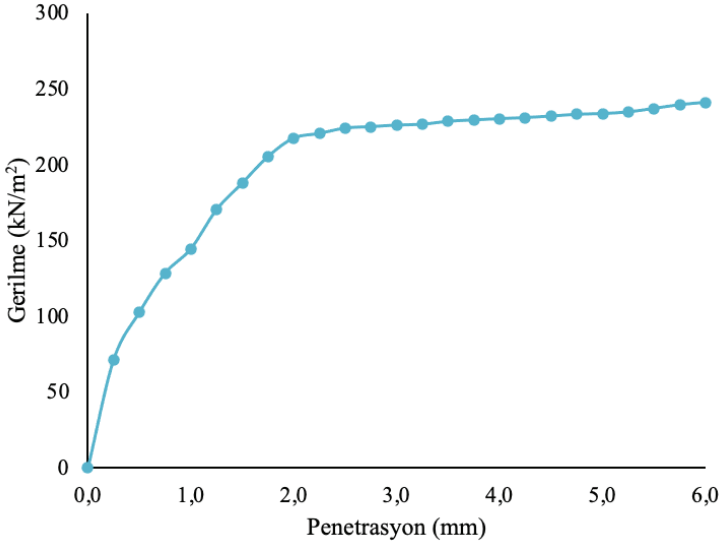
BULGULAR VE TARTIŞMA

ASTM D422 standardına göre gerçekleştirilen elek analizi ile doğal zeminin ince dane oranı %84 olarak belirlenmiştir. ASTM D4318 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kıvam limitleri deneyi ile doğal zeminin likit limiti %51, plastik limiti %19 ve plastisite indisi ise %32 olarak elde edilmiştir. Doğal zemininin optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı ASTM D1557 standardında belirtildiği şekliyle modifiye proktor deneyi gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Deneye ait grafik Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Doğal zemin modifiye proktor deney sonucu

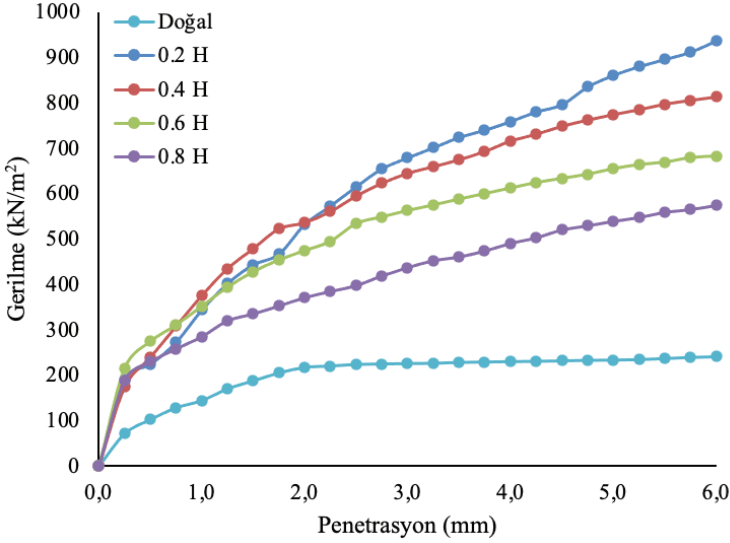
Doğal zemin için gerçekleştirilen yaş CBR deney sonucu Şekil 6'da verilmiştir. Deney sonucuna göre zeminin yaş CBR değeri %3,25 olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Doğal zemin yaş CBR deney sonucu

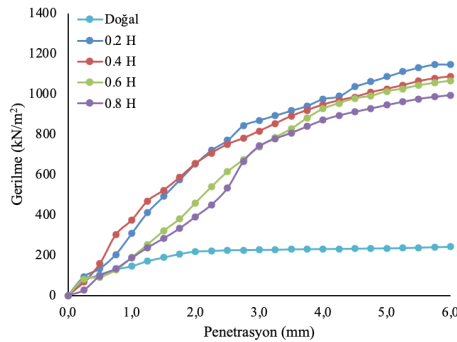
Numunenin üst yüzeyinden yüksekliğinin değişen oranlarında olacak şekilde farklı derinliklere geogridler yerleştirilerek gerçekleştirilen yaş CBR deney sonuçlarına ait gerilme penetrasyon grafikleri Şekil 7, Şekil 8

ve Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 7’de görüldüğü gibi CBR deney sonucuna göre 30/30 çift yönlü geogrid için en yüksek gerilme değeri geogridin numune üst yüzeyinden 0,2H derinliğe yerleştirilmesi durumunda elde edilmiştir. Bu geogrid için en düşük gerilme değeri ise geogridin numune üst yüzeyinden 0,8H derinliğe yerleştirilmesi durumunda elde edilmiştir.



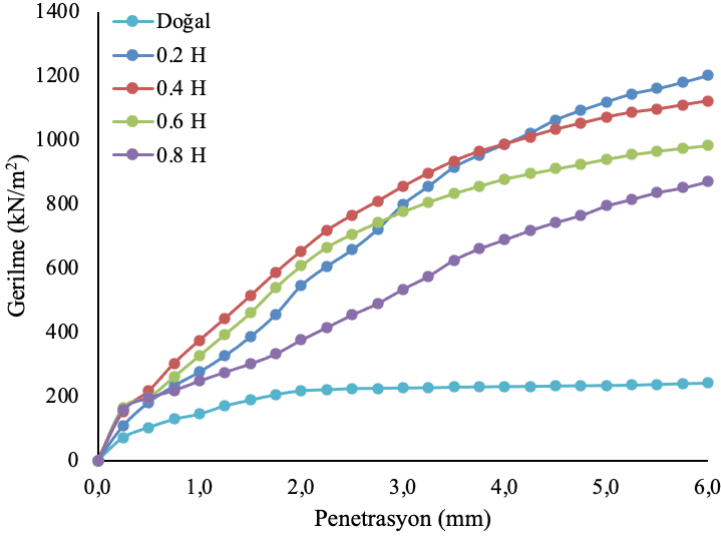
Şekil 7. 30/30 Çift yönlü geogrid ile güçlendirilmiş yaş CBR deney sonuçları

Şekil 8’de görüldüğü üzere 60/60 çift yönlü geogrid için gerçekleştirilen CBR deney sonucunda en yüksek gerilme değeri geogridin numune üst yüzeyinden 0,2H derinliğe yerleştirilmesi durumunda, en düşük gerilme değeri ise geogridin numune üst yüzeyinden 0,8H derinliğe yerleştirilmesi durumunda elde edilmiştir.



Şekil 8. 60/60 Çift yönlü geogrid ile güçlendirilmiş yaş CBR deney sonuçları

Şekil 9’da verildiği gibi 80/80 çift yönlü geogrid için yapılan CBR deney sonucunda diğer geogridlere benzer şekilde en yüksek gerilme değeri geogridin numune üst yüzeyinden 0,2H derinliğe yerleştirilmesi durumunda elde edilirken en düşük gerilme değeri de aynı şekilde 0,8H derinliğe yerleştirilmesi durumunda elde edilmiştir.



Şekil 9. 80/80 Çift yönlü geogrid ile güçlendirilmiş yaş CBR deney sonuçları

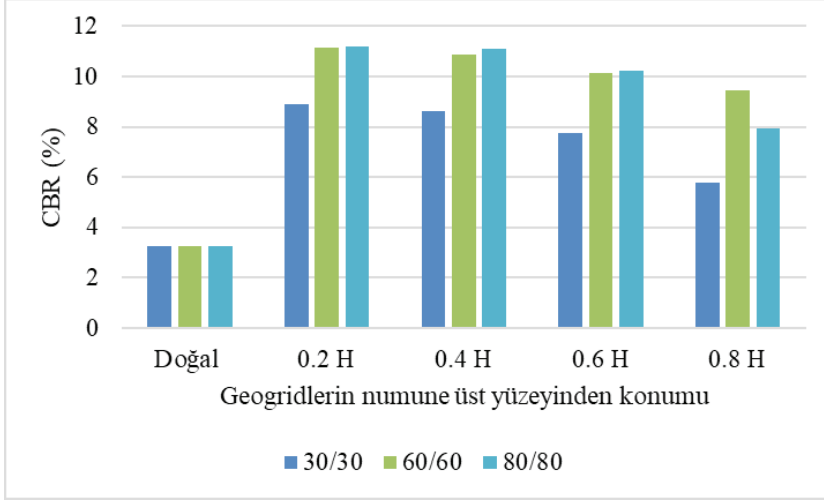
Çalışmada kullanılan tüm geogridler için belirlenen yaş CBR değerleri Tablo 2’de verilirken karşılaştırmalı grafikleri ise Şekil 10’da verilmiştir.

Tablo 2. Yaş CBR değerleri

Doğal Zemin	Geogrid Tipi	Geogridin numune üst yüzeyinden yerleştirme derinliği			
		0.2 H	0.4 H	0.6 H	0.8 H
3,25	30/30	8,91	8,62	7,74	5,76
3,25	60/60	11,15	10,86	10,13	9,45
3,25	80/80	11,19	11,09	10,24	7,95

Tablo 2 ve Şekil 10 detaylı olarak incelendiğinde 30/30 çift yönlü geogrid için en yüksek yaş CBR değeri % 8,91 değeri ile 0,2H derinliğinde elde edilirken en düşük yaş CBR değeri %5,76 değeri ile 0,8H derinliğinde elde edilmiştir. 60/60 çift yönlü geogrid için en yüksek yaş CBR değeri % 11,15 değeri ile 0,2H derinliğinde elde edilirken en düşük yaş CBR

değeri %9,45 değeri ile 0,8H derinliğinde elde edilmiştir. Benzer şekilde 80/80 çift yönlü geogrid için yine en yüksek yaş CBR değeri % 11,19 değeri ile 0,2H derinliğinde elde edilirken en düşük yaş CBR değeri %7,95 değeri ile 0,8H derinliğinde elde edilmiştir.



Şekil 10. CBR deney sonuçlarının karşılaştırılması

4 gün su tankında bekletilen tüm CBR deney numunelerindeki şişme değerleri kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçlarından geogridlerin tamamının doğal zemininin şişme değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada farklı türdeki geogridlerin yol taban zeminlerinin yaş CBR değeri üzerindeki değişiminin incelendiği bir dizi deneysel çalışmalar sunulmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Farklı türdeki geogridlerin kullanımı doğal zeminlerin yaş CBR değerlerini yaklaşık 2 ila 3 kat arasında arttırmıştır.
- Geogridin konumunun yaş CBR değerleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Doğal zemine göre geogridlerin tamamında en yüksek yaş CBR değeri geogridin numune üst yüzeyinden 0,2H derinliğe yerleştirilmesi durumu için elde edilmiştir. Numune üst yüzeyinden uzaklaştıkça geogridin yaş CBR değerleri üzerindeki etkisi azalmıştır.
- Ölçüm sonuçlarından geogridin doğal zemininin şişme değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında laboratuvar ortamında CBR kalıpları ile gerçekleştirilen deneylerde geogridlerin taban zeminlerinin yaş CBR değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. Ancak CBR kalıpları boyut itibariyle küçük olduklarından arazideki davranışı tam olarak yansıtamayacaktır. Bu bağlamda arazide yapılacak CBR deneyleri ile yol taban zeminlerinin güçlendirilmesinde geogridin sağlayacağı katkılar daha net olarak belirlenecektir. Bu çalışma gerçekleştirilecek büyük ölçekteki hem arazi hem de laboratuvar deneylerine öncü olacaktır.

KAYNAKÇA

- Abu-Farsakh, M., Hanandeh, S., Tang, X., & Chen, Q. (2016). Sustainability evaluation of geosynthetic stabilized soft subgrade soil in unpaved test sections. *Geo-Chicago 2016*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Adams, C. A., Apraku, E., & Opoku-Boahen, R. (2015). Effect of triaxial geogrid reinforcement on CBR strength of natural gravel soil for road pavements. *Journal of Civil Engineering Research*, 5(2), 45-51. doi: 10.5923/j.jce.20150502.05
- Adams, C. A., Tuffour, Y. A., & Kwofie, S. (2016). Effects of soil properties and geogrid placement on CBR enhancement of lateritic soil for road pavement layers. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 4(2), 62-66. doi:10.12691/ajcea-4-2-4
- Aga, S. Y. (2021). Physical stabilization of expansive subgrade soil using locally produced geogrid material. *SN Applied Sciences*, 3(5). doi:10.1007/s42452-021-04560-1
- Ahmed Kamel, M., Chandra, S., & Kumar, P. (2004). Behaviour of subgrade soil reinforced with geogrid. *International Journal of Pavement Engineering*, 5(4), 201–209. doi:10.1080/1029843042000327122
- Akolade, A. S., & Olaniyan, O. S. (2014). Application of geogrids on the geotechnical properties of subgrade materials under soaked condition. *The International Institute for Science, Technology and Education, Civil and Environmental Research*, 6(7), 12-19.
- Al-Barqawi, M., Aqel, R., Wayne, M., Titi, H., & Elhajjar, R. (2021). Polymer geogrids: A review of material, design and structure relationships. *Materials*, 14(16), 4745. doi:10.3390/ma14164745
- ASTM D422-63e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org.
- ASTM D854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
- ASTM D4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- ASTM D1557-12e1, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.
- ASTM D1883-16, Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

- Cuelho, E. V., & Perkins, S. W. (2017). Geosynthetic subgrade stabilization – Field testing and design method calibration. *Transportation Geotechnics*, 10, 22–34. doi:10.1016/j.trgeo.2016.10.002
- Dhule, S. B., Valunekar, S. S., Sarkate, S. D., & Korrane, S. S. (2011). Improvement of flexible pavement with use of geogrid. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16, 269-279.
- Gandhimathi, A., & Aravind, R. (2019). An experimental study on effect of lime and geogrid in pavement thickness. *Materials Science Forum*, 972, 57–63. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.972.57
- Jahandari, S., Tao, Z., Saberian, M., Shariati, M., Li, J., Abolhasani, M., Kaze-mi, M., Rahmani, A. & Rashidi, M. (2022). Geotechnical properties of lime-geogrid improved clayey subgrade under various moisture conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 23(9), 2057–2075. doi:10.1080/14680629.2021.1950816
- Jayakumar, J., Venkatesh, J., & Selvaraju, Y. R. (2020). Expansive subgrade strength improvement using geogrid and geotextile layers. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 955(1), 012064. doi:10.1088/1757-899x/955/1/012064
- Kaur, M., & Aggarwal, S. K., (2020). Effect on CBR value of expansive soil with geogrid reinforcement. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET) (11)* 8, 482-489. doi: 10.34218/IJARET.11.8.2020.047
- Kuity, A., & Roy, T. K. (2013). Utilization of geogrid mesh for improving the soft subgrade layer with waste material mix compositions. *Procedia, Social and Behavioral Sciences*, 104, 255–263. doi:10.1016/j.sbspro.2013.11.118
- Kumar, M. M. & Tamilarasan, V.S. (2020) Improvement of CBR using geosynthetic reinforcement. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7(4), 931-938.
- Leonardi, G., Lo Bosco, D., Palamara, R., & Suraci, F. (2020). Finite element analysis of geogrid-stabilized unpaved roads. *Sustainability*, 12(5), 1929. doi:10.3390/su12051929
- Mittal, A., & Shukla, S. (2019). Strength improvement of poor subgrade soil reinforced with polyester biaxial geogrid. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 13(2).
- Nair, K. S., & Deepthy, B. L. (2017). Improvement of soft subgrade using geogrid reinforcement. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) (IJERT)*. ISSN: 2278-0181 ETCEA - 2017 Conference Proceedings, 5(08), 62-64.
- Ogunkunbi, G. A., & Jimoh, Y. A. (2019). Design and economic analysis of a flexible pavement on a geosynthetic reinforced subgrade. *Journal of Applied Sciences & Environmental Management*, 23(1), 121-125. doi:10.4314/jasem.v23i1.18

- Olaniyan, O. S. & Akolade, A. S. (2014). Reinforcement of subgrade soils with the use of geogrids. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3(6). 2579-2584.
- Oliver, T., Wayne, M., & Kwon, J. (2016). Mechanical stabilization of unbound layers to increase pavement performance and incorporation of benefits into M-E analysis. *Procedia Engineering*, 143, 896–910. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.153
- Pisini, S., Thammadi, S., Nadan, M., Edward, N., & Nisha, S. (2022). Experimental study on strength behaviour of geogrid reinforced subgrade soil. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1084 (2022), 012025). IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/1084/1/012025
- Rajesh, U., Sajja, S., & Chakravarthi, V. K. (2016). Studies on engineering performance of geogrid reinforced soft subgrade. *Transportation Research Procedia*, 17, 164–173. doi:10.1016/j.trpro.2016.11.072
- Roodi, G. H., & Zornberg, J. G. (2020). Long-term field evaluation of a geosynthetic-stabilized roadway founded on expansive clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(4), 05020001. doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002206
- Sahoo, T. K., Choudhary, A. K. (2015). Improvement in CBR characteristics of red mud using single geogrid layer. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(03). doi:10.17577/ijertv4is030100
- Sharbaf, M., & Ghafoori, N. (2021). Laboratory evaluation of geogrid-reinforced flexible pavements. *Transportation Engineering*, 4(100070), 100070. doi:10.1016/j.treng.2021.100070
- Shukla, S.K. (2002). Geosynthetics and Their Applications. *Thomas Telford Publishing*, London, UK, 430 p., ISBN 978-0-7277-3117-3.
- Suresh, A., Jose, D., & Maliyakal, G. J. (2018). CBR Characteristics of soils stabilised with geogrid. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 5(3), 30–34. doi:10.14445/23488352/ijce-v5i3p106
- Susanto, H. A., Yang, S.-H., & Duc, M. A. (2022). Performance evaluation of geogrid in flexible pavement using mechanical-empirical design approach. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(2), 442–456. doi:10.1007/s42947-021-00030-4
- Tabatabaei, S. A., & Rahman, A. (2013). The effect of utilization of geogrids on reducing the required thickness of unpaved roads. *Advanced Materials Research*, 712–715, 937–941. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.712-715.937
- Unni, A., A.K Mithrathmajan, Rajkumar, S., Meril, V. & Neenu, M.B. (2017). Efficacy of geosynthetics in subgrade stabilization-a comparative study in laterite soil . *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6(4), 6709-6716. doi:10.15680/IJIR-SET.2017.0604087

- Vishwanath, B. J. (2018). Experimental investigation of black cotton and sandy soil using geogrid as soil reinforcement. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 6(5), 383-386. <http://doi.org/10.22214/ijraset.2018.5063>
- Wimalasena, K., & Jayalath, C. P. G. (2020). Effect of geogrid reinforcement in weak subgrades. *GEOMATE Journal*, 18(65), 140-146. doi: <https://doi.org/10.21660/2020.65.90377>
- Zhao, A., Williams, G. S., & Waxse, J. A. (1997). Field performance of weak subgrade stabilization with multilayer geogrids. *Geotextiles and Geomembranes*, 15(4-6), 183-195. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(97\)10001-2](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(97)10001-2)
- Ziegler, M. (2017). Application of geogrid reinforced constructions: history, recent and future developments. *Procedia Engineering*, 172, 42–51. doi:10.1016/j.proeng.2017.02.015
- Zornberg, J. G. (2017). Functions and applications of geosynthetics in roadways. *Procedia Engineering*, 189, 298–306. doi:10.1016/j.proeng.2017.05.048
- Zumrawi, M.M., & Mansour, N. (2016). Laboratory evaluation of geogrids used for stabilizing soft subgrades. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 10, 418-421.

“

BÖLÜM 8

MİKROALGAL BİYORYAKIT ÜRETİMİNDE OMİKS YAKLAŞIMLARI

Esmâ ÖZHÜNER¹

Mehmet Ali BİBERCİ²

”

1 Dr. Öğr. Üyesi, Çankırı Karatekin Üniversitesi Gıda ve Tarım Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, esmaozhuner@karatekin.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-5456-3496

2 Dr. Öğr. Üyesi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, m.alibiberci@karatekin.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-0328-9538

1.Giriş

Enerji sektöründe, yakıt olarak en fazla fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Önümüzdeki yirmi yıl için fosil yakıt rezervlerinin var olduğu bilinmektedir. Ancak, fosil yakıtların kullanımı iklim değişikliği, hava kirliliğinden kaynaklanan çeşitli flora ve faunanın tahribi ve sürekli artan petrol fiyatlarının neden olduğu ekonomik kaygılar gibi bazı ciddi sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu sorunlar, araştırmacıları fosil yakıtlara alternatif ürün arayışlarına ve geliştirmelerine neden olmuştur. Fosil yakıtların aksine alternatif olarak geliştirilen biyoyakıtın toksik olmaması, biyolojik olarak parçalanabilmesi, karbon nötr ve yenilenebilir olması, ayrıca kültür içermemesi en büyük avantajlarından (Chaturvedi vd., 2020).

Biyoyakıtlar, bitkiler, meyveler veya mahsul atıkları, gıda mahsulleri, algler ve gübre de dâhil olmak üzere çeşitli biyokütle kaynaklarından dönüştürülebilmektedir. Biyoyakıtlar, biyokütle kaynaklarından piroliz, anaerobik sindirim veya anaerobik fermentasyon (karanlık fermentasyon) dahil olmak üzere çeşitli işlemler yoluyla dönüştürülmektedir (Ghai vd., 2022; Olabi vd., 2022). Piroliz, 350–600 °C’de gerçekleşen oksijensiz termal bozunmadır. Piroliz sıvısı olarak da adlandırılan üretilen biyo-yag, tıpkı ham petrol gibidir ve çok çeşitli biyoyakıtlar üretmek için kullanılabilir. Anaerobik sindirim, çürütülmüş bir ürünü besinler, biyoyakıtlar, biyokömür, alg yetiştirme ve polihidroksialkanoatlar (PHA) için bir hammadde olarak kullanarak döngüsel bir ekonominin sağlanmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (Malhotra vd., 2022). Karanlık fermentasyon, yüksek karbonhidrat seviyelerine sahip substratlardan ekstrakte edilen anaerobik bakterilerin ışıksız yani karanlık ortamda biyoyakıtların üretilmesinde kullanılmaktadır (Soares vd., 2020).

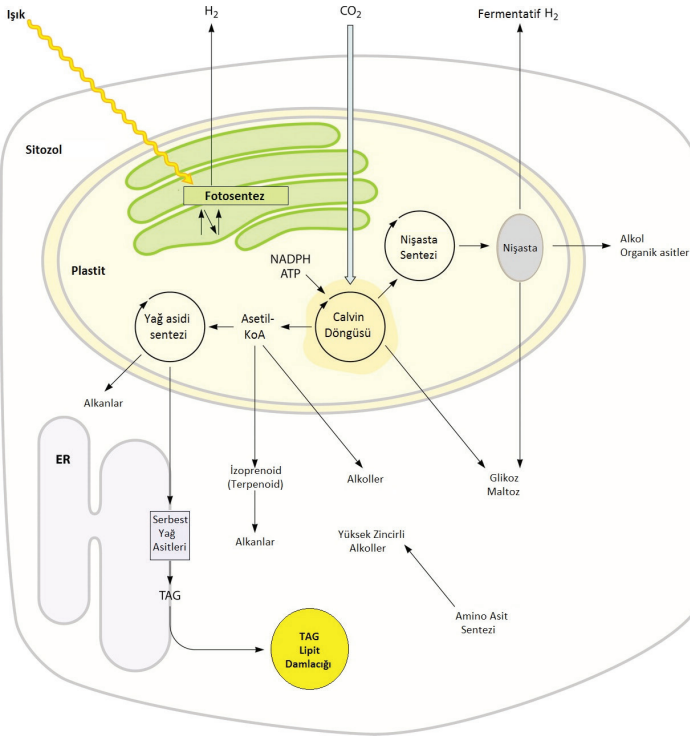
Hammadde farklılıklarına dayalı olarak, biyoyakıtlar üç kategoriye ayrılabilir: birinci nesil, ikinci nesil ve üçüncü nesil. Birinci neslin yenilenebilir hammaddeleri arasında soya fasulyesi, mısır, buğday, kolza tohumu yağı, şeker kamışı, mısır ve şeker pancarı gibi yenilenebilir ham maddeler kullanılırken, ikinci nesil biyoyakıtlar ise atık kızartma yağı ve hayvanlardan elde edilen atık yağlar ile dallı darı otu ve jatropha gibi özel lignoselülozik hammaddelerden elde edilmektedir (Zhu vd., 2016). Hem birinci hem de ikinci nesil biyoyakıtların en büyük dezavantajlarından birisi, bu gıda veya gıda dışı mahsullerin biyoyakıt hammaddesi olarak yetiştirilmesi için sınırlı ekilebilir tarım arazilerine ihtiyaç duyulması ve bundan dolayı sürdürülebilir olmamasıdır. Öte yandan; birinci ve ikinci nesil biyoyakıt hammaddesi ile karşılaştırıldığında üçüncü nesil biyoyakıt hammaddesi olarak mikroalgler, yüksek fotosentetik verimlilik, hızlı büyüme, yüksek lipid içeriği, yüksek oranda CO₂ azaltma verimliliği, tarım arazileri için gıda mahsulleri ile rekabet etmemesi ve toprak mahsullerinden daha az su kullanması gibi önemli ayırt edici avantajlara sahip-

tir (Babu vd., 2022). Bu nedenle, 3. nesil biyoyakıtlar verimli, avantajlı, sürdürülebilir ve çevre dostudur (Brindhadevi vd., 2022). Ayrıca, [Tablo 1](#)'de gösterildiği gibi, mikroalgler hızlı büyür ve diğer yağ mahsullerine kıyasla daha yüksek biyokütle üretkenliği ve yağ verimi sağlamaktadırlar. Yüksek yağ içeriğine sahip mikroalgler, palmiye yağı gibi geleneksel biyodizel mahsullerinin veriminden 25 kata kadar daha yüksek bir yağ verimi üretme potansiyeline sahiptir. Kuru biyokütlenin ağırlığına göre en az %70 yağ üretimine sahip olan mikroalgler, yılda 121.104 kg biyodizel üretmek için arazinin kg'ı başına yalnızca 0,1 m² yıl gerekmektedir. Bu büyük üretim değeri, mikroalglerin bitkiler arasında en fazla biyodizel üreten hurma yağından bile kaç katı kadar fazla olması biyodizel üretiminde mikroalglerin potansiyel olarak iyi bir kaynak olduğunu göstermektedir (Ahmad vd., 2011; Mata vd., 2010)

Tablo 1. Mikroalglerin diğer biyodizel hammaddeleri ile karşılaştırılması
(Ahmad vd., 2011; Mata vd., 2010)

Bitki kaynağı	Tohum yağı içeriği (biyokütlede ağırlıkça % yağ)	Yağ verimi (l yağ/ha/yıl)	Arazi kullanımı (m ² yıl/kg biyodizel)	Biyodizel verimliliği (kg biyodizel/ha/yıl)
Mısır/Mısır (<i>Zea mays</i> L.)	44	172	66	152
Kenevir (<i>Cannabis sativa</i> L.)	33	363	31	321
Soya fasulyesi (<i>Glycine max</i> L.)	18	636	18	562
Jatrofa (<i>Jatropha curcas</i> L.)	28	741	15	656
Camelina (<i>Camelina sativa</i> L.)	42	915	12	809
Kanola/kolza tohumu (<i>Brassica napus</i> L.)	41	974	12	862
Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.)	40	1070	11	946
Hintyağı (<i>Ricinus communis</i>)	48	1307	9	1156
Hurma yağı (<i>Elaeis guineensis</i>)	36	5366	2	4747
Mikroalg (düşük yağ içeriği)	30	58.700	0.2	51.927
Mikroalg (orta yağ içeriği)	50	97.800	0.1	86.515
Mikroalg (yüksek yağ içeriği)	70	136.900	0.1	121.104

Mikroalglerden biyoyakıt üretimi, yüksek alansal üretkenlikleri, düşük çevresel etkileri ve gıda güvenliği üzerindeki ihmal edilebilir özelliklerde olması en büyük avantajlar arasında sayılırken; mikroalg biyokütlesindeki düşük verimli lipid içeriği nedeniyle yüksek ekonomik maliyet getirmesi ise alg bazlı biyoyakıtların ticarileştirilmesinin önündeki başlıca engeldir. Son yıllarda genetik mühendisliği stratejileri kullanılarak üretim maliyetinin azaltılması ve ekonomik olarak uygun hale getirilmesi için alg yağı içeriğinin artırılması ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya da devam etmektedir. Bu çalışmalar yapılmasında, mikroalglerin metabolik yollarından yararlanmak mümkün olabilmektedir (Şekil 1) (Radakovits vd., 2010). Mikroalglerden biyodizel sentezi için en önemli lipid türü nötral trigliseritler veya triaçilgliserol (TAG)'lerdir. Mikroalgler, H_2O ve CO_2 'yi kullanarak ışık enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek karbonhidratlar, lipidler ve proteinler gibi önemli organik bileşenleri üretmektedir. Fotooksidatif stres veya diğer ciddi çevresel koşullar altında, mikroalgler büyük hacimlerde biyoyakıt depoları olarak kullanılan TAG'ler oluşturabilmektedir (Radakovits vd., 2010).

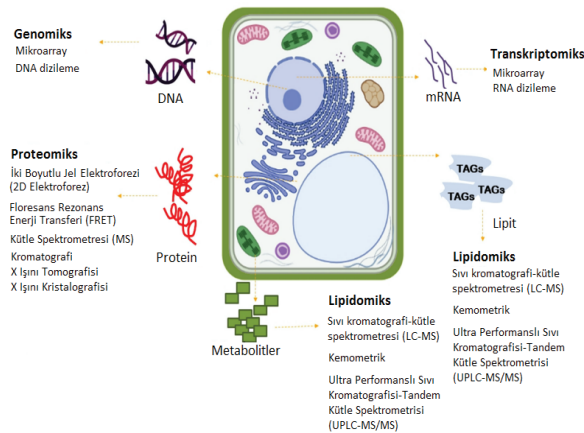


Şekil 1. Biyoyakıt üretimi için kullanılacak mikroalg metabolik yolları. ER, endoplazmik retikulum. (Radakovits vd. makalesinden modifiye edilmiştir) (Radakovits vd., 2010)

2. Biyokütle ve Lipit Üretiminin İyileştirilmesinde Omiks Yaklaşımları

Bilimsel çalışmaların son on yılında, biyoloji araştırmalarında bir çığır açan, “omik” olarak bilinen teknoloji yeni ve genç moleküler tekniklerin muazzam bir yükselişi ve uygulanması olmuştur. “Omik” yaklaşımları, hücre içindeki toplam DNA (tüm genleri içerir), proteinler ve metabolitler gibi tüm bileşenlerin ve biyomoleküllerin kapsamlı bir şekilde incelenmesi için araçlar sağlamıştır (Şekil 2). Genom analizi, yalnızca tek tek genleri ve genlerin dizilişini tanımlamakla kalmayan, aynı zamanda gen dizilimi ve dizi benzerliğine göre genomlar arasında karşılaştırmalar yapmaya yardımcı olan mikroalg popülasyonu hakkında herhangi bir dizi bilgisi için en önde gelen tekniktir (Mishra vd., 2019).

Genomik teknikler arasında nükleotit dizileri, yeni nesil dizileme yöntemleri, eksprese edilmiş dizi etiketleri (EST’ler), ligasyon pirodizileme, rekombinant cDNA’lar, gerçek zamanlı dizileme sayılabilmektedir. Mikroalglerde genom dizileme, genlerin fonksiyonel analizi ve ayrıca lipit üretkenliği perspektifinde metabolik yolları anlamak için pek çok mikroalgde dizilenmiş ve araştırılmıştır. Mikroalglerde lipid birikimi, istenen ürünü elde etmek için lipidlerin biyosentezinde yer alan transkripsiyonel faktörlerin dahil edildiği mutant üretimi için genetik araçlar kullanılarak geliştirilebilmektedir. Örneğin; tek hücreli yeşil alg *C. reinhardtii*’nin tüm genom dizilimi yayınlanmış olup, birçok fonksiyonel çalışma için model sistem olarak kullanılmaktadır (Merchant vd., 2007) *C. reinhardtii*’deki biyoyakıt üretimini anlamak için çeşitli omik yaklaşımları tanımlamıştır (Grossman vd., 2007). Diğer biyoyakıt üretiminde potansiyel olan ve genomu çalışılan mikroalgler ise Tablo 2’de verilmiştir (Mishra vd., 2019).



Şekil 2. Mikroalgler için omik yaklaşımları şeması (Babu vd., 2022)

Transkriptomik, proteomik ve metabolomik gibi hızla gelişen post-genomik sistem biyolojisi yaklaşımları, mikroorganizmaların fiziksel ortamlarındaki değişikliklere nasıl tepki verdiklerini ve bunlara nasıl uyum sağladıklarını anlamak için önemlidir (Guarnieri vd., 2011). Örneğin, model yeşil alg *Chlamydomonas reinhardtii*'nin transkriptomu, besin açısından zengin, anaerobik H₂ üreten ve kükürtten arındırılmış büyüme koşulları altında karakterize edilmiştir (Mus vd., 2007).

Moellering ve arkadaşları alg lipid damlacık biyogenezinde işlev gören hem potansiyel olarak yeni hem de korunmuş proteinleri belirlemek için nitrojen sınırlı *C. reinhardtii* hücrelerinin lipid damlacıklarında TAG birikimini incemişler ve aday proteinleri belirlemişlerdir (Moellering & Benning, 2010). Bu organizma için kaydedilen en iyi hücresel lipid birikimi, yabani tip kültürlerde sadece ~%20 olduğunu, ancak nişastasız mutantlar için ise bu oran ~%40 toplam lipid biriktirdiğini rapor etmişlerdir. Pek çok sekanslanmamış yabani tip mikroalg suşunun ise, aynı büyüme koşulları altında %50'den fazla toplam lipid ürettiği bildirilmiştir .

Tablo 2. Tüm genom dizilerinin yapıldığı mikroalglerin ve biyoyakıt üretimi için potansiyel adayların listesi (Mishra vd., 2019).

Mikroalgler	Referanslar
<i>Chromochloris zofingiensis</i> SAG 211-14	(Roth vd., 2017)
<i>Parachlorella kessleri</i>	(Ota vd., 2016)
<i>Cymbomonas tetramitiformis</i>	(Satjarak vd., 2016)
<i>Chlamydomonas sphaeroides</i>	(Hirashima vd., 2016)
<i>Nannochloropsis gaditana</i> CCMP526	(Jinkerson vd., 2013)
<i>Monoraphidium neglectum</i>	(Bogen vd., 2013)
<i>Coccomyxa subellipsoidea</i> C-169	(Blanc vd., 2012)
<i>Volvox carteri f. magariensis</i>	(Prochnik vd., 2010)
<i>Chlorella variabilis</i> NC64A	(Blanc vd., 2010)
<i>Picochlorum</i> sp. SENEW3	(Bowler vd., 2008)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	(Merchant vd., 2007)
<i>Osreococcus tauri</i>	(Derelle vd., 2006)
<i>Geitlerinema</i> sp.	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29518464
<i>Chromochloris zofingiensis</i>	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28484037
<i>Chlorella protothecoides</i>	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25012212
<i>Coccomyxa</i> sp. LA000219	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCA_000812005.1/#/st
<i>Coccomyxa</i> sp. SUA001	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCA_001244535.1
<i>Nannokloropsis oceanica</i> LAMB0001	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCA_000226695.1
<i>Nannokloropsis oceanica</i> OZ-1	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCF_001614235.1
<i>Micromonas pusilla</i> CCMP1545	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCF_000151265.2
<i>Coelastrella</i> sp. M60	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCA_001630525.1
<i>Micromonas</i> sp. ASP10-01a	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCA_001630525.1
<i>Osreococcus lucimarinus</i>	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCF_000092065.1
<i>Micromonas commoda</i>	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCF_000090985.2
<i>Kültürlenmemiş Bathycoccus</i>	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCA_000259855.1
<i>Auxenochlorella protothecoides</i>	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCF_000733215.1
<i>Gonium pectorale</i>	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCA_001584585.1
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCA_001430745.1
<i>Chlorella vulgaris</i>	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCA_001021125.1
<i>Trebouxia gelatinosa</i>	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCA_000818905.1

Alglerdeki lipid konsantrasyonu, kuru ağırlığın %80'ine kadar çıkabilmektedir. Dünya genelinde *Dunaliella*, *Porphyridium*, *Isochrysis*, *Tetraselmis*, *Nannochloropsis*, *Phaeodactylum*, *Chlorella* ve *Schizochytrium* türlerinde lipid konsantrasyonları %20 ile %50 arasında bulunmuştur.

Yağ asitleri lipidlerin temel bileşenleri olduğundan, asetil-CoA ve malonil-CoA gibi yağ asidi metabolik öncülerinin mevcudiyetinin artırılması, lipid üretiminde birincil adım olarak düşünülmüştür. Birçok araştırmacı tarafından ACC geninin aşırı ifade edilmesinin lipid üretimini artırıp artırmadığı merak konusu olmuştur (Tablo 3). Örneğin; *Cyclorella cryptic* mikroalg'inden ACC geni aşırı eksprese edildiğinde, enzim aktivitesinin 2-3 kat arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, Sheehan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sadece ACC geninin ekspresyonunu arttırmanın tüm lipid üretim sürecini iyileştirmek için yeterli olmayabileceği sonucuna varmıştır. Öteyandan yapılan başka bir çalışmada ise, yağ asidi oksidasyonunda doğrudan yer alan genlerin yanı sıra triasilgliserit (TAG) ve serbest yağ asidi aktivasyonunda yer alan genlerin etkisizleştirilmesiyle lipid içeriğinde bir artış sağlanmıştır. Pek çok mikroalg, gün boyunca TAG depolamaya başlar ve gece aydınlık-karanlık döngüleri sırasında hücre ATP gereksinimlerini ve/veya hücre bölünmesini sürdürmek için bu depoları boşaltmaktadır (Olabi vd., 2022).

Tablo 3. Çeşitli mikroalg türlerinde aşırı gen ifadesine bağlı lipid gelişimi (Olabi vd., 2022)

Türler	Aşırı ifade edilen genler	Lipit Artışı
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	ACCase	TAGs 2,4 kat artış
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	G6PD	Lipitlerde %55,7 artış
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	GPAT1; LPAT1	TAG'lerde 2,3 kat artış
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	G3PDH	Lipitlerde 1,9 kat artış
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	G6PD	Lipitlerde 2,7 kat artış
<i>Chlorella protothecoides</i>	ME	Lipitlerde 2,8 kat artış
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	PSR1	Nişasta granüllerinde iyileşme, lipid miktarında azalma
<i>Nannokloropsis salina</i>	bZIP	Büyüme ve lipitte gelişme
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	DGTA	Artan doymuş yağ asitleri
<i>Chlorella minutissima</i>	GPAT; LPAAT; DGAT	Lipit miktarında 2 kat artış
<i>Nannokloropsis okyanus otu</i>	NoDGAT1A	TAG'lerde 2,4 kat iyileştirme
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	NAD(H) kinaz	Lipid miktarında 1,6 kat artış
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	LPAAT	TAG'lerde %20'lik bir iyileştirme
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	DGAT	Lipitlerde %69 artış

GPAT: Gliserol-3-fosfat aseiltransferaz; LPAT: Lizofosfatidik aseiltransferaz; DGAT: Diasilgliserol aseiltransferaz; N: Azot; ME: Malik enzim; ACCase: Asetil-CoA karboksilaz; LPAAT: Lizofosfatidik asit aseiltransferaz; G3PDH: Gliseraldehit-3-fosfat dehidrojenaz; G6PD: Glukoz-6-fosfat dehidrojenaz ve DGAT: asil-Co-A: diasilgliseroller asiltransferaz.

3.Sonuç

Mikroalg bazlı biyodizel henüz pazarlanmamıştır. Bunun nedeni, toplam işleme maliyetinin petrol bazlı yakıtlara göre iki katı olmasından dolayıdır. Mikroalglerin büyümesi, kültür bakımı, biyokütle üretimi, lipit verimi, ekstraksiyon ve daha sonra biyodizele dönüşüm için her adım, fosil yakıtlara kıyasla uygun maliyetli biyodizel üretimi elde etmek için yüksek çaba ve strateji gerektirmektedir. Ancak, son yıllarda çığır açan omiks teknolojileri ile mikroalgal biyoyakıt üretiminin iyileştirilmesinde çok fazla ivme kazanılmıştır.

KAYNAKLAR

- Ahmad, A. L., Yasin, N. H. M., Derek, C. J. C., & Lim, J. K. (2011). Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 584-593. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.018>
- Babu, S. S., Gondi, R., Vincent, G. S., JohnSamuel, G. C., & Jeyakumar, R. B. (2022). Microalgae Biomass and Lipids as Feedstock for Biofuels: Sustainable Biotechnology Strategies. *Sustainability*, 14(22), Art. 22. <https://doi.org/10.3390/su142215070>
- Blanc, G., Agarkova, I., Grimwood, J., Kuo, A., Brueggeman, A., Dunigan, D. D., Gurnon, J., Ladunga, I., Lindquist, E., Lucas, S., Pangilinan, J., Pröschold, T., Salamov, A., Schmutz, J., Weeks, D., Yamada, T., Lomsadze, A., Borodovsky, M., Claverie, J.-M., ... Van Etten, J. L. (2012). The genome of the polar eukaryotic microalga *Coccomyxa subellipsoidea* reveals traits of cold adaptation. *Genome Biology*, 13(5), R39. <https://doi.org/10.1186/gb-2012-13-5-r39>
- Blanc, G., Duncan, G., Agarkova, I., Borodovsky, M., Gurnon, J., Kuo, A., Lindquist, E., Lucas, S., Pangilinan, J., Polle, J., Salamov, A., Terry, A., Yamada, T., Dunigan, D. D., Grigoriev, I. V., Claverie, J.-M., & Van Etten, J. L. (2010). The *Chlorella variabilis* NC64A Genome Reveals Adaptation to Photosymbiosis, Coevolution with Viruses, and Cryptic Sex. *The Plant Cell*, 22(9), 2943-2955. <https://doi.org/10.1105/tpc.110.076406>
- Bogen, C., Al-Dilaimi, A., Albersmeier, A., Wichmann, J., Grundmann, M., Rupp, O., Lauersen, K. J., Blifern-Klassen, O., Kalinowski, J., Goessmann, A., Musgnug, J. H., & Kruse, O. (2013). Reconstruction of the lipid metabolism for the microalga *Monoraphidium neglectum* from its genome sequence reveals characteristics suitable for biofuel production. *BMC Genomics*, 14(1), 926. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-14-926>
- Bowler, C., Allen, A. E., Badger, J. H., Grimwood, J., Jabbari, K., Kuo, A., Maheswari, U., Martens, C., Maumus, F., Otiilar, R. P., Rayko, E., Salamov, A., Vandepoele, K., Beszteri, B., Gruber, A., Heijde, M., Katinka, M., Mock, T., Valentin, K., ... Grigoriev, I. V. (2008). The *Phaeodactylum* genome reveals the evolutionary history of diatom genomes. *Nature*, 456(7219), Art. 7219. <https://doi.org/10.1038/nature07410>
- Brindhadevi, K., Mathimani, T., Ganesan, R., Sekar, M., Shanmugam, S., Phuong, T. N., Alharbi, S. A., Chinnathambi, A., Chanasut, U., & Whangchai, K. (2022). Central composite design for the optimization of CaO and Fe₂(SO₄)₃ facilitated transesterification of *Scenedesmus* sp. Oil for fatty acid methyl ester production. *Fuel*, 321, 124096. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124096>
- Chaturvedi, V., Goswami, R. K., & Verma, P. (2020). Genetic Engineering for Enhancement of Biofuel Production in Microalgae. İçinde P. Verma (Ed.),

Biorefineries: A Step Towards Renewable and Clean Energy (ss. 539-559). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9593-6_21

- Derelle, E., Ferraz, C., Rombauts, S., Rouzé, P., Worden, A. Z., Robbens, S., Partensky, F., Degroeve, S., Echeynié, S., Cooke, R., Saeys, Y., Wuyts, J., Jabbari, K., Bowler, C., Panaud, O., Piégu, B., Ball, S. G., Ral, J.-P., Bouget, F.-Y., ... Moreau, H. (2006). Genome analysis of the smallest free-living eukaryote *Ostreococcus tauri* unveils many unique features. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(31), 11647-11652. <https://doi.org/10.1073/pnas.0604795103>
- Ghai, H., Sakhuja, D., Yadav, S., Solanki, P., Putatunda, C., Bhatia, R. K., Bhatt, A. K., Varjani, S., Yang, Y.-H., Bhatia, S. K., & Walia, A. (2022). An Overview on Co-Pyrolysis of Biodegradable and Non-Biodegradable Wastes. *Energies*, 15(11), Art. 11. <https://doi.org/10.3390/en15114168>
- Guarnieri, M. T., Nag, A., Smolinski, S. L., Darzins, A., Seibert, M., & Pienkos, P. T. (2011). Examination of Triacylglycerol Biosynthetic Pathways via De Novo Transcriptomic and Proteomic Analyses in an Unsequenced Microalga. *PLOS ONE*, 6(10), e25851. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025851>
- Hirashima, T., Tajima, N., & Sato, N. (2016). Draft Genome Sequences of Four Species of *Chlamydomonas* Containing Phosphatidylcholine. *Genome Announcements*, 4(5), e01070-16. <https://doi.org/10.1128/genomeA.01070-16>
- Jinkerson, R. E., Radakovits, R., & Posewitz, M. C. (2013). Genomic insights from the oleaginous model alga *Nannochloropsis gaditana*. *Bioengineering*, 4(1), 37-43. <https://doi.org/10.4161/bioe.21880>
- Malhotra, M., Aboudi, K., Pisharody, L., Singh, A., Banu, J. R., Bhatia, S. K., Varjani, S., Kumar, S., González-Fernández, C., Kumar, S., Singh, R., & Tyagi, V. K. (2022). Biorefinery of anaerobic digestate in a circular bioeconomy: Opportunities, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112642. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112642>
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, Nidia. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217-232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Merchant, S. S., Prochnik, S. E., Vallon, O., Harris, E. H., Karpowicz, S. J., Witman, G. B., Terry, A., Salamov, A., Fritz-Laylin, L. K., Maréchal-Drouard, L., Marshall, W. F., Qu, L.-H., Nelson, D. R., Sanderfoot, A. A., Spalding, M. H., Kapitonov, V. V., Ren, Q., Ferris, P., Lindquist, E., ... Grossman, A. R. (2007). The *Chlamydomonas* Genome Reveals the Evolution of Key Animal and Plant Functions. *Science*, 318(5848), 245-250. <https://doi.org/10.1126/science.1143609>

- Mishra, A., Medhi, K., Malaviya, P., & Thakur, I. S. (2019). Omics approaches for microalgal applications: Prospects and challenges. *Bioresource technology*, 291, 121890.
- Moellering, E. R., & Benning, C. (2010). RNA Interference Silencing of a Major Lipid Droplet Protein Affects Lipid Droplet Size in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Eukaryotic Cell*, 9(1), 97-106. <https://doi.org/10.1128/EC.00203-09>
- Mus, F., Dubini, A., Seibert, M., Posewitz, M. C., & Grossman, A. R. (2007). Anaerobic Acclimation in *Chlamydomonas reinhardtii*: ANOXIC GENE EXPRESSION, HYDROGENASE INDUCTION, AND METABOLIC PATHWAYS *. *Journal of Biological Chemistry*, 282(35), 25475-25486. <https://doi.org/10.1074/jbc.M701415200>
- Olabi, A. G., Alami, A. H., Alasad, S., Aljaghoub, H., Sayed, E. T., Shehata, N., Rezk, H., & Abdelkareem, M. A. (2022). Emerging Technologies for Enhancing Microalgae Biofuel Production: Recent Progress, Barriers, and Limitations. *Fermentation*, 8(11), Art. 11. <https://doi.org/10.3390/fermentation8110649>
- Ota, S., Oshima, K., Yamazaki, T., Kim, S., Yu, Z., Yoshihara, M., Takeda, K., Takeshita, T., Hirata, A., Bišová, K., Zachleder, V., Hattori, M., & Kawano, S. (2016). Highly efficient lipid production in the green alga *Parachlorella kessleri*: Draft genome and transcriptome endorsed by whole-cell 3D ultrastructure. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0424-2>
- Prochnik, S. E., Umen, J., Nedelcu, A. M., Hallmann, A., Miller, S. M., Nishii, I., Ferris, P., Kuo, A., Mitros, T., Fritz-Laylin, L. K., Hellsten, U., Chapman, J., Simakov, O., Rensing, S. A., Terry, A., Pangilinan, J., Kapitonov, V., Jurka, J., Salamov, A., ... Rokhsar, D. S. (2010). Genomic Analysis of Organismal Complexity in the Multicellular Green Alga *Volvox carteri*. *Science*, 329(5988), 223-226. <https://doi.org/10.1126/science.1188800>
- Radakovits, R., Jinkerson, R. E., Darzins, A., & Posewitz, M. C. (2010). Genetic Engineering of Algae for Enhanced Biofuel Production. *Eukaryotic Cell*, 9(4), 486-501. <https://doi.org/10.1128/EC.00364-09>
- Roth, M. S., Cokus, S. J., Gallaher, S. D., Walter, A., Lopez, D., Erickson, E., Endelman, B., Westcott, D., Larabell, C. A., Merchant, S. S., Pellegrini, M., & Niyogi, K. K. (2017). Chromosome-level genome assembly and transcriptome of the green alga *Chromochloris zofingiensis* illuminates astaxanthin production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(21), E4296-E4305. <https://doi.org/10.1073/pnas.1619928114>
- Satjarak, A., Paasch, A. E., Graham, L. E., & Kim, E. (2016). Complete Chloroplast Genome Sequence of Phagomixotrophic Green Alga *Cymbomonas tetramitiformis*. *Genome Announcements*, 4(3), e00551-16. <https://doi.org/10.1128/genomeA.00551-16>

- Soares, J. F., Confortin, T. C., Toderó, I., Mayer, F. D., & Mazutti, M. A. (2020). Dark fermentative biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Technological challenges and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109484. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109484>
- Zhu, L. D., Li, Z. H., & Hiltunen, E. (2016). Strategies for Lipid Production Improvement in Microalgae as a Biodiesel Feedstock. *BioMed Research International*, 2016, e8792548. <https://doi.org/10.1155/2016/8792548>

“

BÖLÜM 9

NİKEL CEVHER ATIKLARININ KURŞUNLU ÇİNİ SIRLARINDA DEĞERLENDİRMESİ

Hale YILDIZAY¹

”

1 Dr.Öğr. Üyesi., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Güzel Sanatlar Meslek Yüksek Okulu, Çini sanatı ve Tasarımı Bölümü, Germiyan Kampüsü, 43100 Kütahya, TÜRKİYE

hale.yildizay@dpu.edu.tr, Tel:05055276767, Orcid no: 0000-0002-3896-9912

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesine paralel olarak ortaya çıkan en önemli konulardan birisi de sürdürülebilir bir kalkınma planlamasıdır. Endüstride ortaya çıkan atıklar geri dönüşüm politikasıyla birlikte pek çok sürdürülebilir kalkınma planlanmasını etkilemektedir. Endüstride üretim süreçleri sonucu oluşan atıkların doğru bir şekilde kullanımı, sürdürülebilir bir atık yönetimi için önem kazanmaktadır. Bu yüzden insan sağlığını bozan ve çevreyi kirleten atıkların oluşturduğu zararı azaltmak için bu konularla ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Hammaddelerin teknolojik ürünlerin üretimi için yaygın bir şekilde kullanımı sonucunda; bu hammaddelerin üretimi sırasında oluşan atıkların kullanılabilirliği çevrenin korunmasını artırmakta ve ayrıca ürünün endüstrideki katma değerinin artmasına yardımcı olmaktadır.

Çinide kullanılan sır, çini bünyesinin yüzeyini çok ince bir şekilde kaplayan ve belirli bir sıcaklıkta eriyen farklı bileşenlere sahip camsı tabaka oluşumudur (Arcasoy, 1983). Çini sırlarının renklendirilmesi için, farklı bileşenlere sahip doğal hammaddeler, bir veya daha çok metal oksit içeriğiyle hazırlanmış pigmentler kullanılmaktadır. Sırlar içerisine ilave edilen pigmentler, sırların bileşimi içerisinde kristal yapılarını koruyarak küçük taneler halinde dağılırlar ve ergimezler (Eppler, 2000).

Sırlarda kullanılan pigmentlerin üretimi genellikle oksitlerinin belirli oranlarda karışımlarından oluşur. Pigmentlerin üretiminde kontrol dışı farklı bileşenlerin varlığı istenmediği için çoğunlukla saf oksitlerin kullanımı tercih edilmektedir. Pigment üretimi esnasında saf oksitlerin kullanımı pigment üretim maliyetini arttırmaktadır. Bu maliyetini azaltmak için saf oksitlere göre daha kolay ve ucuz bir şekilde temin edilen doğal hammaddeler ve/veya değerli metalleri içeren alternatif hammadde kaynaklarının kullanımıyla ilgili birçok çalışma yapılmaktadır (Ozel, Küçük, ve Turan, 2002); (Yıldızay H.ve Taşçı E, 2019).

Ülkemizde pigment üretim alanında yerli teknolojinin çok fazla gelişmemesinden dolayı pigment temini için ithalat yapılmaktadır. Çini ürünlerde son ürünün maliyetinin nedenlerinden birisi de renklendirici olarak kullanılan pigmentlerin fiyatı da etkin bir rol oynamaktadır.

Kurşunlu çini sırları, düşük sıcaklıkta gelişmesi ve pişmesi, oldukça parlak olması ve renkleri daha canlı hale getirmesinden dolayı çini sektöründe tercih edilen sırlardır. Kurşun normalde zehirli ve zararlı bir bileşiktir. Çini sektöründe zehirsiz olarak kabul edilen sülyen formu kullanılmaktadır (Arcasoy, 1983). İşletmelerde kullanılan kurşunlu çini sırları fritleştirme işlemiyle hazırlanmaktadır. Bu işlemle kurşun zehirsiz ve zararsız hale getirilerek kurşunlu sırların çinide kullanımı artırılmıştır.

Çini ve seramik sırlarını renklendirirken pigmentler kullanılmaktadır. Pigmentler yapımında ağır metal oksitler bulunduran üretim maliyeti yüksek olan renklendiriciler olarak tanımlanır. (Mirdalı, 2017). Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte gelişen sanayi sonucunda hammadde kullanımı da artmaktadır. Hammaddelerin kullanımının artmasıyla birlikte oluşan yan ürünler ve atıkların doğaya verdiği zararda geri dönüşümsüz bir hal almaktadır. Hammaddelerin yanı sıra ortaya çıkan bu atıkları seramik bünye ve sırlarında kullanarak üretime katkı sağlamak için yeni sırlar ve bünyeler üretmek konusunda çalışmalar yapılmaktadır (Yang, Xu, Cai, Wang, Xiu, Zhao, Sun, and Cao, 2013); (Karasu, Kaya, ve Çakır, 2011); (Yesilay, Cakı, ve Ceylantekin, 2017); (Tanisan, ve Turan, 2011). Hammadde atıklarının renklendirici olarak kullanımı ile seramik sektöründe sır maliyetlerinin düşmesinde önemli rol oynamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda pişen seramik yapılar içerisine hapsedilen atıklar çevresel açıdan da avantaj sağlamaktadır. Çevreye büyük zararlar veren hammadde atıklarının seramik sektöründe değerlendirilmesiyle ilgili yapılan çalışmalarda olumlu sonuçlar alınmıştır. (Pehlivan, Yazıcı, M; Güner, G, 2014).

Seramikte nikel cevher atığının kullanımına yönelik olarak Yıldızay ve Taşçı' nın yapmış olduğu çalışmalarda Ni-Co kompozit atığının stoneware bünyelerde mekanik özelliklere etkisi ve Ni-Co Atığının Borlu Sırlarda Etkilerinin İncelenmesi, adlı çalışmalarda atığın seramik bünye ve borlu sırlardaki renk tonlarının etkisi gösterilmiş ve kullanılan atığın bünyede ve sırda renklendirici olarak kullanımının uygunluğu gösterilmiştir (Yıldızay ve Taşçı, 2021); (Yıldızay ve Taşçı, 2022).

Çalışma kapsamında, Meta Nikel Kobalt Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasının Manisa İli, Gördes ilçesinde bulunan nikel cevherinin işlenmesi sonucu ortaya çıkan atıklarının çini sırlarında kullanılarak çini sektöründe renklendirici olarak kullanımı araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmalarda kullanılan nikel cevher atığının kimyasal ve mineralojik özellikleri incelenmiştir. Daha sonra nikel cevher atığı çini bisküvi pişirimi yapılmış bünyeler üzerine kurşunlu sır reçetesi içerisine farklı oranlarda ilave edilerek elektrikli fırın ortamında 950 °C'de 8 saat pişirilmiştir. Sır içerisine nikel cevher atığı ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20 oranında ilave edilmiştir. Hazırlanan nikel cevher atığı içeren çini sırları çini bünyeler üzerine akıtma yöntemi ile uygulanmış ve çini fırınında pişirilmiştir. Atığın çini sırna eklendiği orana bağlı olarak sarı renkten kırmızı kahverengine kadar değişen renkler görülmüştür. Sırlanmış çini yüzeylerinde $L^* a^* b^*$ analizleri yapılmış ve kullanılan atık malzemenin çini sırlarındaki renk değişimiyle birlikte farklılıkları belirlenmiştir. Daha sonra hazırlanan çini sırlarının analizleri yapılmış ve nikel cevher atığının sır reçeteleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

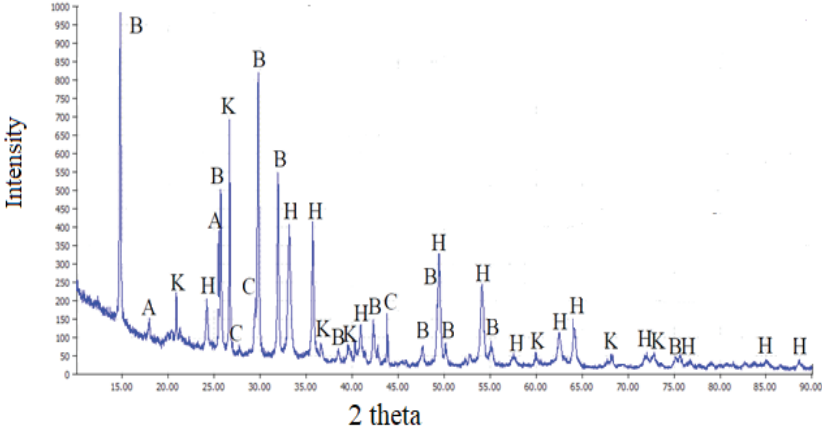
Çalışmada kullanılan nikel cevheri atığı renklendirici kaynağı olarak kullanılmış ve Gördes -Manisa bölgesindeki Meta Nikel Kobalt A.Ş'den sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda çini bünyeler ve üzerinde kullanılan kurşun bileşimli sır Sedef El Sanatları firmasından temin edilmiştir.

Çalışmaya başlamadan önce nikel cevher atığına kimyasal analiz (XRF) yapılmıştır. Atığın analizi için eritişi Panalytical marka Eagon 2 model cihazında, kimyasal analizi Panalytical marka Axios MAX model cihazında yapılmış ve Çizelge 1’de verilmiştir. Atığın analizi Çizelge 1’de verilmektedir. Kullanılan nikel cevheri atığının Empyrean Pan Analytical XRD cihazıyla mineralojik özellikleri incelenmiş Şekil 1’ de verilmiştir.

Çizelge 1. Çini sırlarının içerisinde değerlendirilen nikel atığının kimyasal analizi

Oksitler	%
SiO₂	22.16
Al₂O₃	4.37
Fe₂O₃	27.63
CaO	13.8
MgO	1.96
K₂O	0.11
TiO₂	0.09
Cr₂O₃	1.49
Mn₃O₄	0.05
NiO	0.15
SO₃	18.64
L.o.I*	9.55

L.o.I*: Kızdırma kaybı

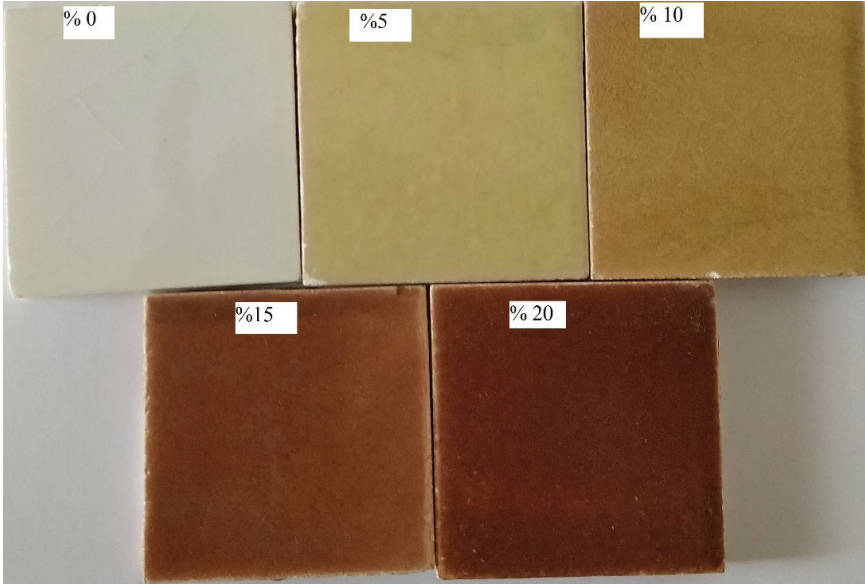


Şekil 1. *Nikel cevheri atığının XRD analizi*

XRD analizine bakıldığında atığın içeriğinde Kuvars, Hematit, Basanit ve Alunitin karakteristik piklerini gözlemlenmiştir. Ayrıca; atığın yapısında Fe, Mg, Ca Silikat minerallerinin minör piklerine rastlanmıştır.

Çalışmada nikel cevher atığı kullanılarak kurşunlu çini sırları renklendirilmiştir. Kullanılan atık nemli bir şekilde temin edildiğinden kullanılmadan önce etüvde kurutulmuştur. Daha sonra 63 µm'lik elekten geçirilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan atık çini işletmesinden temin edilen ham kurşunlu çini sıırı içerisine %5, %10, %15 ve %20 gibi artan oranlarda ilave edilerek sulu bir şekilde jet değirmende 15-20 dakika arası karıştırılmıştır. Çini sıırı içerisine %1 oranında karboksil metil selüloz (CMC) ilavesi yapılarak sıırın çini üzerine daha kolay uygulanması ve yapışması sağlanmıştır. CMC ilave edilen çini sırları en fazla 2 gün kadar bekletilmelidir. Çünkü CMC belli bir süreden sonra özelliğini yitirerek sıırın uygulanmasını zorlaştırır ve sıırı bozar. Kullanılan sırların viskozitesi 20 sn, litre ağırlığı 1430 g/l'ye ayarlanmıştır. Çini sırlar bisküvi bünyeler üzerine uygulandıktan sonra oda sıcaklığında kuruması için bekletilir. Daha sonra sıırı gelişme sıcaklığına çıkarılır ve pişirilir.

Bu işlem sonrasında standart kurşunlu çini sıırıyla birlikte nikel cevher atığı ilave edilen diğer kurşunlu sıırlardaki değişimler gözlenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmada bisküvi pişirimi yapılmış çini bünyeler üzerine uygulanan % 0, 5, 10, 15 ve 20 oranında nikel cevher atık katkılı kurşunlu sırların pişirme sonrası yüzey fotoğrafları Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. *Nikel cevher atıklarının kurşunlu çini sıırı içerisinde ağırlıkça, % 0, %5, % 10, % 15 ve % 20 oranında ilavesi*

%5 ve %10 atık ilaveli kurşunlu çini sırında sarı ve deve tüyü renklerinin oluştuğu sırın parlaklığını koruduğu görülmektedir. %15 ve %20 'lik pigment ilavelerinde kırmızı kahverengi tonlarının oluştuğu ve kurşunlu sırda gözle gözlemlenen bir şekilde sırın matlaştığı görülmektedir. Bu durum çini sırları için dezavantaj olarak görülürken, günümüzde bazı uygulamalar için görünüm bakımından avantaj olarak kabul görebilmektedir.

Kullanılan standart kurşunlu çini sırlarının ve atık ilave edilen sırların renk özellikleri ölçülmüştür. Sırların renk ölçümleri Konica Minolta-Spectrophotometer CM-700 d cihazı ile yapılmıştır. Renk ölçüm sonuçları L^* a^* b^* parametreleri olarak Çizelge 2'de ifade edilmiştir. Renk ölçümleri $L^* = 100$ beyaz rengi ve $L^* = 0$ siyah rengini, $(-a^*)$ yeşil ve $(+a^*)$ kırmızı arasındaki renkleri, $(-b^*)$ mavi, $(+b^*)$ sarı arasındaki renkleri ifade etmektedir. ΔE değeri ölçümü yapılan sırların standart renge göre içerdiği renk farklılığını tanımlamak için kullanılır. Hesaplaması yapılan ΔE değerinin, 1'den küçük olması durumunda renk farklılıkları ayırt edilemezken, ΔE değerinin 1'den büyük olması durumunda renk farklılıklarının ayırt edilebilir olduğunu ifade etmektedir (Kodak, 2008).

Çizelge 2. *Nikel cevher atıklarının kurşunlu çini sırtına ilavesi sonucu oluşan renk analizleri*

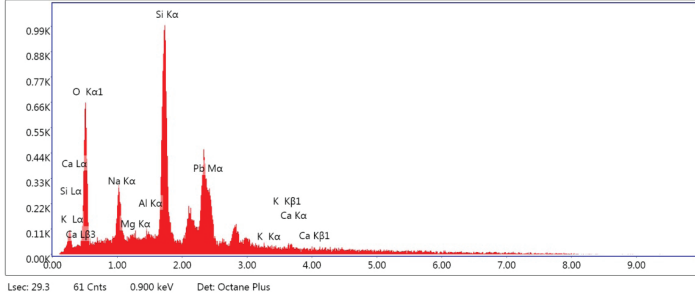
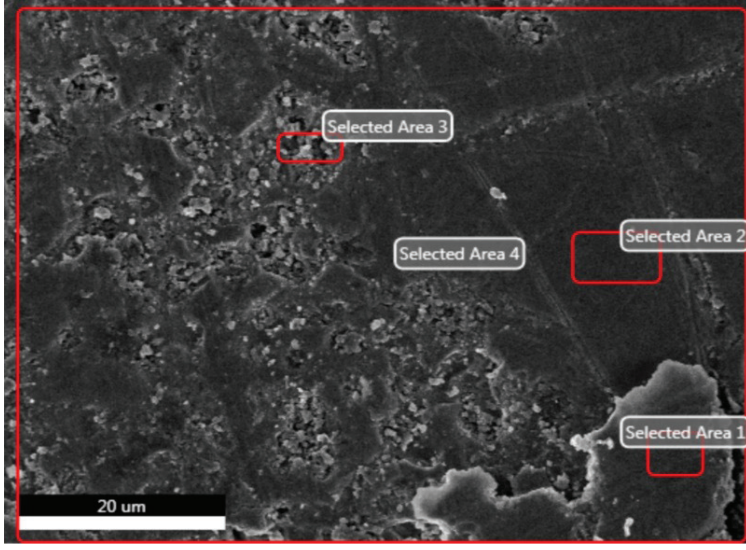
Atık Oranı (%)	L *	a *	b *
0	86.91	-0.73	3.25
5	75.01	-1.97	34.46
10	62.35	6.52	33.84
15	43.17	15.40	21.65
20	37.70	14.02	13.90

Çizelge 2’de standart kurşunlu sır ve atık içeren sırların renk analizi sır yüzeyindeki üç farklı bölgeden ölçülerek ortalama değerleri hesaplanmıştır. Çizelgedan elde edilen sonuçlardan reçetelerindeki nikel cevheri atık miktarının artmasıyla L* değerinin azaldığı, a* ve b* değerlerinin arttığı görülmüştür. Buda rengin koyulaştığını ifade etmektedir. Nikel cevher atığı ilavesiyle a* değeri en yüksek (+15.40) olarak görülmüştür. a* değerinde (+) olduğunda kırmızılığın arttığı göstermektedir. Sarılığı ifade eden b* değerinin, %5 katkılı kurşunlu sırda en yüksek değerde (+34.46) olduğu saptanmıştır. Nikel cevher atığının artırılmasıyla b* değeri sarılık değerinin öncelikle arttığı bu değerin daha sonra atık miktarı artıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak atık miktarının çini sırtı içerisinde artması farklı renkler elde edilmesine yol açtığını göstermektedir. Atığın yüzdesel (%) olarak arttığı renklerin sarıdan renginden kırmızı kahverengiye doğru değiştiği görülmektedir.

2.1. Mikroyapı Analizleri

Hazırlanan kurşunlu sırlar içerisinde nikel atığının kullanımı sonucunda ortaya çıkan mikroyapı analizleri, FEI NANO SEM 650 ile marka cihaz ile belirlenmiştir.ve EDS analizleri EDAX EDS ilaveli taramalı elektron mikroskobuyla belirlenmiştir

Şekil 3’te %5 atık içeren kurşunlu çini sır reçetelerinin değişen bütüme oranından alınan SEM analizleri görülmektedir. Bu analizlerde görümlenen Nikel cevher atığının sır içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Şekil 4’te %5 nikel cevher atıklı kurşunlu sır yüzeyinden sağlanan EDX analizi yer almaktadır. Sır yüzeyinden sağlanan EDX analizlerinin oksit oranları Çizelge 3’te verilmektedir.

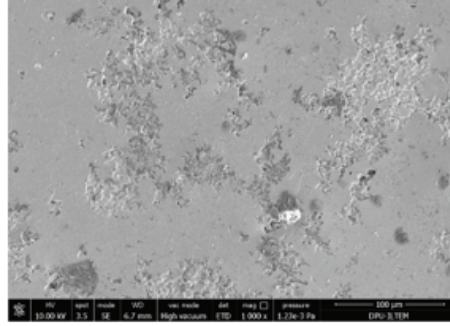


Şekil 4. Nikel cevher atığının %5 oranında reçetesine ilavesiyle elde edilen ve sır yüzeyine ait EDX paternleri, Na, Mg, K, Pb ve Ca sır yüzeyi üzerinde miktarları.

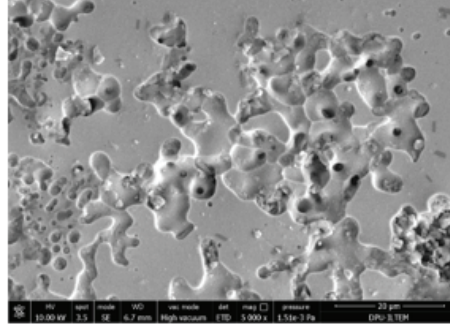
Çizelge 3. Sır yüzeylerindeki oksit oranları

Oksit	%5 katkı
Na ₂ O	5.79
Mg O	3.70
Al ₂ O ₃	4.90
SiO ₂	44.51
PbO ₂	35.13
K ₂ O	1.81
CaO	4.16

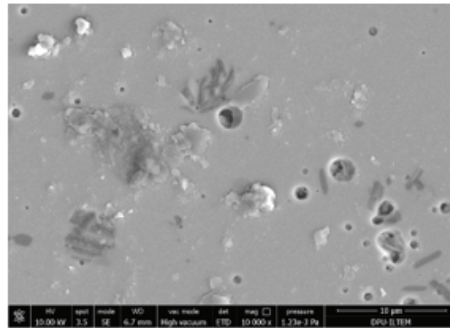
Şekil 5'te %10 atık içeren kurşunlu çini sır reçetelerinin değişen büyütme oranından alınan SEM analizleri görülmektedir. Bu analizlerde görüntülenen Nikel cevher atığının sır içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Şekil 6'da %10 nikel cevher atıklı kurşunlu sır yüzeyinden sağlanan EDX analizi yer almaktadır. Sır yüzeyinden sağlanan EDX analizlerinin oksit oranları Çizelge 4'te verilmektedir.



(a)

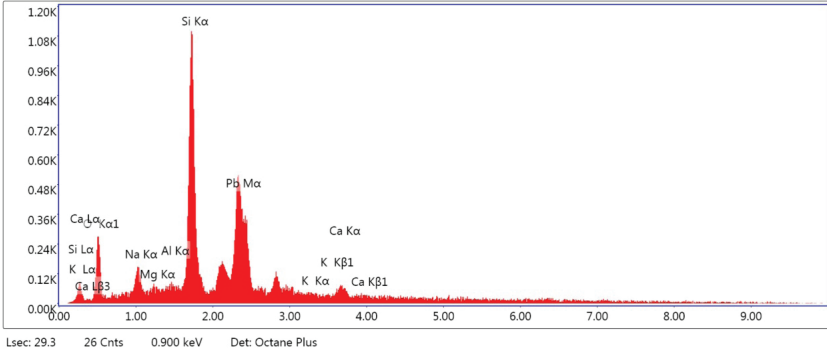
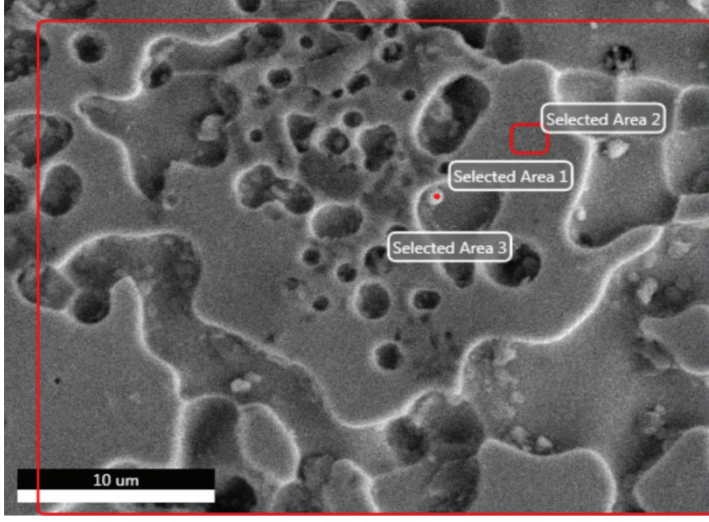


(b)



(c)

Şekil 5. *Nikel cevher atığının %10 oranında kurşunlu sır reçetesi ile ilavesiyle elde edilen ve sır yüzeyine ait a) 1000 X, b) 5000 X ve c) 10000 X'deki SEM mikroyapı görüntüsü ve kristallerin dağılımı.*

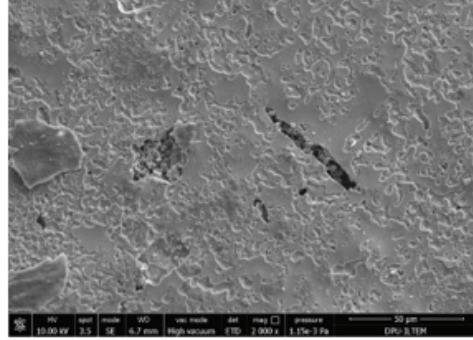


Şekil 6. *Nikel cevher atığının %10 oranında reçetesine ilavesiyle elde edilen ve sır yüzeyine ait EDX paternleri, Na, Mg, K, Pb ve Ca sır yüzeyi üzerinde miktarları.*

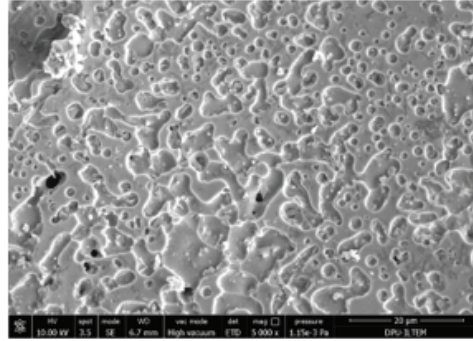
Çizelge 4. *Sır yüzeylerindeki oksit oranları*

Oksit	%10 katkılı
Na ₂ O	5.15
Mg O	1.27
Al ₂ O ₃	2.60
SiO ₂	44.03
PbO ₂	41.32
K ₂ O	1.80
CaO	3.83

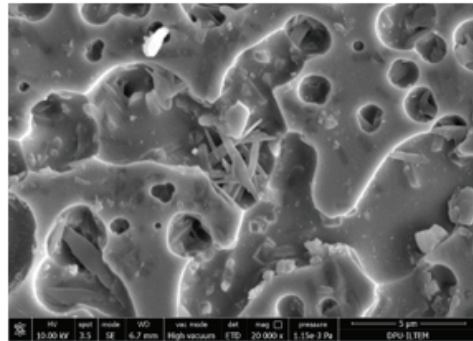
Şekil 7’de %15 atık içeren kurşunlu çini sır reçetelerinin değişen büyütme oranından alınan SEM analizleri görülmektedir. Bu analizlerde görüntülenen Nikel cevher atığının sır içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Şekil 8 ve 9’ da sırasıyla %15 nikel cevher atıklı kurşunlu sır yüzeyinden ve kristallerinden sağlanan EDX analizi yer almaktadır. Sır yüzeyinden sağlanan EDX analizlerinin oksit oranları sırasıyla Çizelge 5 ve 6’da verilmiştir.



(a)

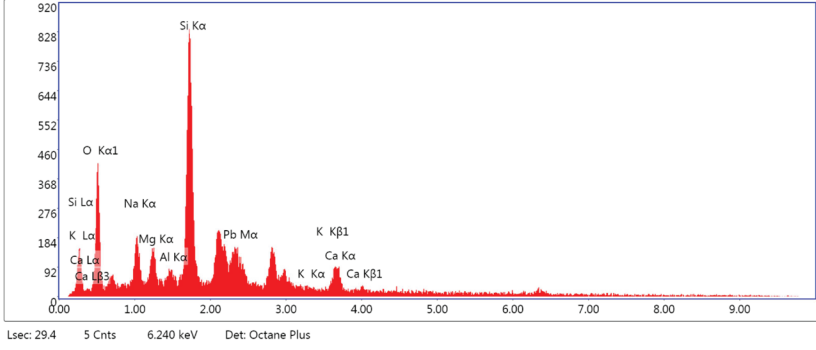
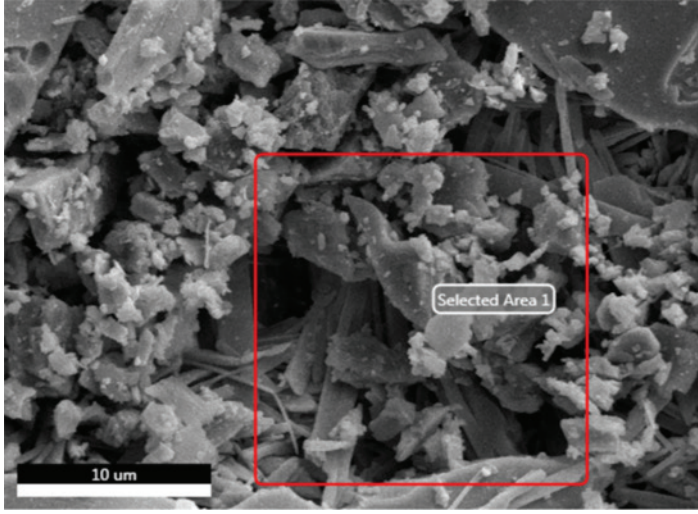


(b)



(c)

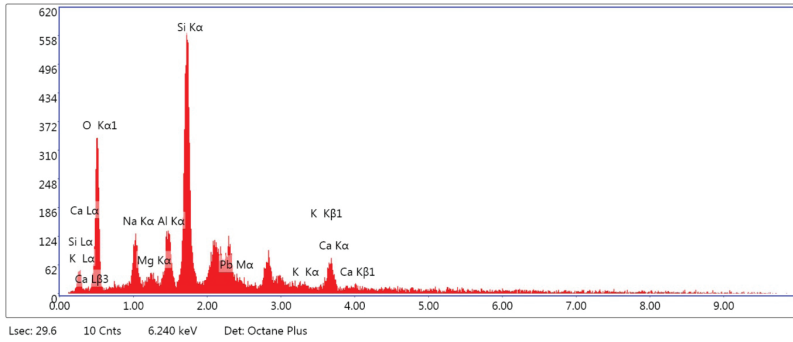
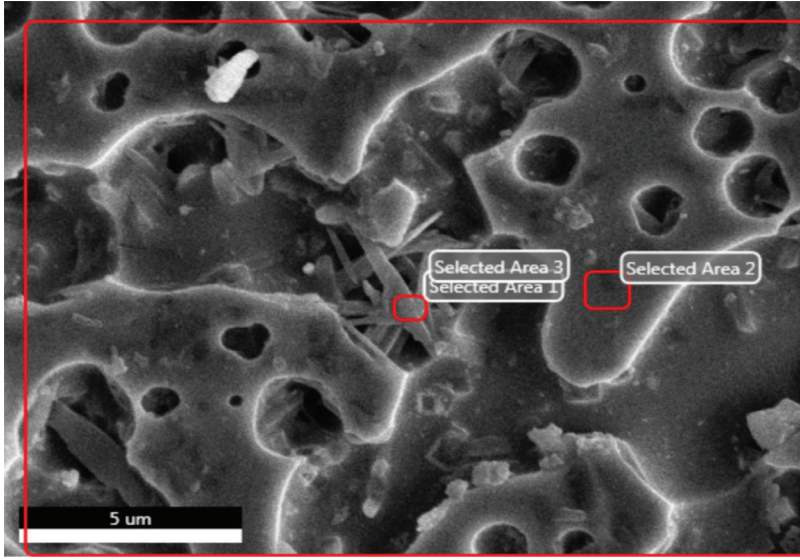
Şekil 7. *Nikel cevher atığının %15 oranında kurşunlu sır reçetesi ile elde edilen ve sır yüzeyine ait a) 2000 X, b) 5000 X ve c) 20000 X’deki SEM mikroyapı görüntüsü ve kristallerin dağılımı.*



Şekil 8. Nikel cevher atığının %15 oranında reçetesine ilavesiyle elde edilen ve sır yüzeyine ait EDX paternleri, Na, Mg, K, Pb ve Ca sır yüzeyi üzerinde miktarları.

Çizelge 5. Sır yüzeylerindeki oksit oranları

Oksit	%10 katkılı
Na ₂ O	4.25
Mg O	0.12
Al ₂ O ₃	7.80
SiO ₂	53.52
PbO ₂	19.34
K ₂ O	0.43
CaO	14.53

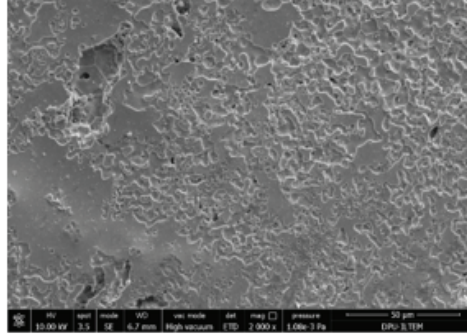


Şekil 9. *Nikel cevher atığının %15 oranında reçetesine ilavesiyle elde edilen ve sır yüzeyinde yer alan kristallere ait EDX paternleri, Na, Mg, K, Pb ve Ca sır yüzeyi üzerinde miktarları.*

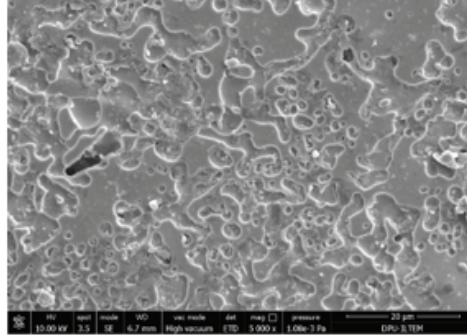
Çizelge 6. *Sır yüzeyindeki kristallere ait oksit oranları*

Oksit	%10 katkı
Na ₂ O	2.77
Mg O	0.54
Al ₂ O ₃	0.13
SiO ₂	47.82
PbO ₂	44.05
K ₂ O	0.21
CaO	4.48

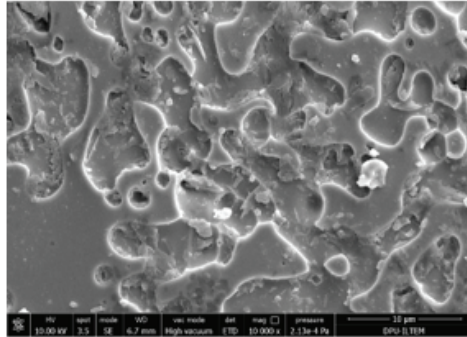
Şekil 10'te %20 atık içeren kurşunlu çini sır reçetelerinin değişen büyütme oranından alınan SEM analizleri görülmektedir. Bu analizlerde görüntülenen Nikel cevher atığının sır içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Şekil 11'de %20 nikel cevher atıklı kurşunlu sır yüzeyinden sağlanan EDX analizi görülmektedir. Sır yüzeyinden sağlanan EDX analizlerinin oksit oranları Çizelge 7'de verilmiştir.



(a)

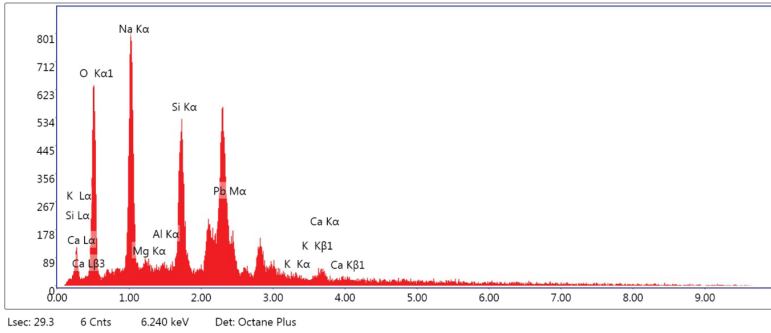
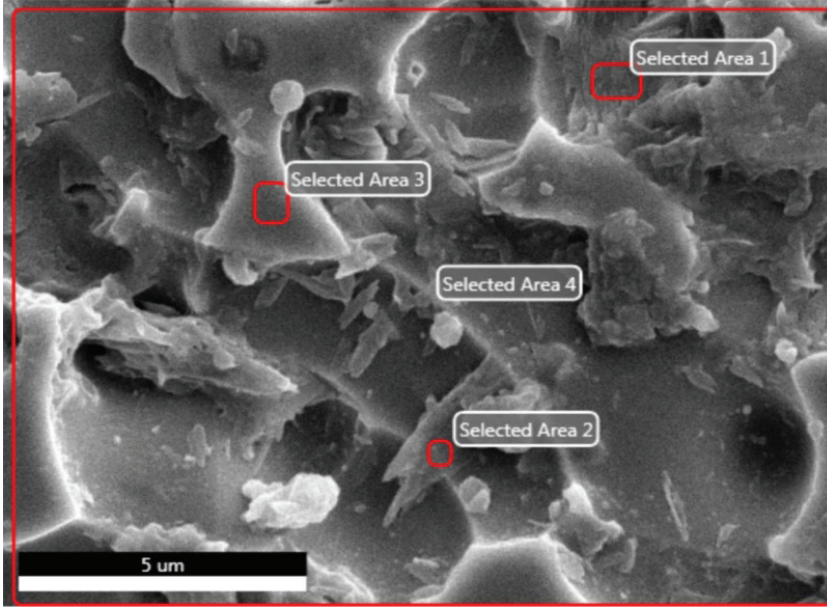


(b)



(c)

Şekil 10. *Nikel cevher atığının %20 oranında kurşunlu sır reçetesine ilavesiyle elde edilen ve sır yüzeyine ait a) 2000 X, b) 5000 X ve c) 20000 X'deki SEM mikroyapı görüntüsü ve kristallerin dağılımı.*



Şekil 11. Nikel cevher atığının %20 oranında reçetesine ilavesiyle elde edilen ve sır yüzeyine ait EDX paternleri, Na, Mg, K, Pb ve Ca sır yüzeyi üzerinde miktarları.

Çizelge 7. Sır yüzeyindeki kristallere ait oksit oranları

Oksit	%10 katkılı
Na ₂ O	20.96
Mg O	0.45
Al ₂ O ₃	0.55
SiO ₂	20.93
PbO ₂	52.53
K ₂ O	0.53
CaO	4.04

Çalışmada kurşunlu çini sır kompozisyonuna nikel cevheri atığının ilave edilmesiyle atığın çini sıraına eklendiği orana bağlı olarak sarı renkten kırmızı kahverengine kadar değişen renk tonları elde edilmiştir. Atık içeren çini sırlarının SEM-EDX sonuçlarında görüldüğü gibi nikel atığının varlığı, sırların bünyeyle uyumunu olumlu yönde etkilemiştir. Bu da atığın geleneksel çini ürün sırlarının renklendirilmesinde rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir.

Nikel cevher atığının kurşunlu çini sır reçetesine ilavesi sonucunda elde edilen sırların farklı büyütmelerde çekilen SEM görüntülerinden genel olarak atığın kurşunlu sır içerisinde ergiyerek cam yapı içerisinde gömüldüğü göstermektedir. Nikel cevher atığının sır içerisindeki kullanımı arttıkça sır içerisindeki kristallenme miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Sır içerisinde gelişen kristal fazların kalın çubuksu camlar şeklinde oluşum gösterdiği ve taramalı mikroskopla yapılan analizlerde büyütme oranı arttıkça bu yapının daha fazla ortaya çıktığı görülmektedir.

Atık katkılı çini sırlarına katılan atığın analizinden Fe içeriğinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Sır yüzeylerinden ve kristallerden alınan EDX analizleri sonucunda yapıların ağırlıklı olarak Si, Al, Ca, Na ve K içerdiği görülmektedir. EDX analizlerindeki kimyasal içerikte atık oranının %5'ten %20'ye artırıldığında sır içerisindeki Na, K, Ca, Al, ve Si oranlarında değişiklikler gözlemlenmiştir. Analizlerinde tespit edilen toprak alkali oksitlerin, sır yapısında yüksek oranda çıkması, parlaklık azalmasının nedeni olarak düşünülebilir.

EDX analizlerinden atıkta kullanılan Fe'in ortaya çıkmadığı görülmektedir. Fe elementi sırlar içerisinde renk verici kuvvetli bir elementtir. Analizler Fe'in kurşunlu sır içerisinde çözünerek ve camsı yapı içerisinde gömülmüş olduğunu göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmanın gerçekleşmesinde, DPU-Bap Projesi, Proje No: 2021/ 37 ile Dumlupınar Üniversitesi ve İleri Teknolojiler Merkezi (İL-TEM) çalışanlarından Mehmet AKKAŞ'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR

1. Arcasoy, A., (1983). Seramik teknolojisi. Marmara Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi, Yayın no:2.
2. Eppler, R.A., (2000). Glazes and Glass Coatings, Am. Ceram. Soc., Westerville, 130-135.
3. Karasu, B., Kaya, G., Çakir, A. (2011). Characterization of diopside-based glass-ceramic porcelain tile glazes containing borax solid wastes. J. Ceram. Process. Res. 12, 135–139
4. Kodak, (2008). Introduction to Color and Printing, Internal Self-Study Guide. ABD.
5. Mirdalı, N.K, (2017). Inorganic wastes in glaze recipes and their effects on micro-structure. Journal of the Australian Ceramic Society. 53, 713–718
6. Ozel, E., Küçük, I., and Turan, S., (2002). Synthesis of an iron-chromium ceramic pigment by using limonite and chromite mixtures. Key Eng. Mater., Vol.206-213, 1227-123.
7. Pehlivan E., Yazıcı M. ve Güner G., (2014). Endüstriyel Katı Atıklar ve Geri Kazanım, ISEM2014, Adıyaman-Türkiye
8. Tanisan, B.,Turan, S. (2011). Black ceramic pigments for porcelain tile bodies produced with chromite ores and iron oxide waste. Journal of Ceramic Processing Research, Vol.12, 462-467.
9. Tanisan, B., and Turan, S. (2012). Synthesis of Fe-Mn black pigments by using hematite waste and manganese ore mixtures. Trans. Indian Ceram. Soc. Vol.71(1),17-22.
10. Yang, Y.G., Xu, J.H., Cai, B., Wang, Q.C., Xiu, D.P., Zhao, Z.B., Sun, Q. Z., and Cao, S. L. (2013). Synthesis and applications of black ceramic from recycled industrial wastes. Advances in Applied Ceramics, 112, 146-148.
11. Yesilay, S., Cakı, M., Ceylantekin, R., (2017). Recycling of Afyon- Iscehisar marble waste in transparent stoneware glaze recipes. J. Aust. Ceram. Soc. 53, 475–484
12. Yıldızay H., Taşçı E, (2022). Ni-Co Atığının Borlu Sırlarda Etkilerinin İncelenmesi, Mühendislik Alanında Teori ve Araştırmalar, Serüven yayınevi,
13. Yıldızay H., Taşçı E. (2021). Ni-Co Kompozit Atığının Stoneware Bünyelerde Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, 6nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC'21), /TURKEY, s.293-298
14. Yıldızay H., Taşçı E, (2019). Lateritik Nikel Cevherinden Elde Edilen Nikel-Kobalt Oksit Kompozitinin Stoneware Sırındaki Renk Etkileri. Akü FEMÜBİD, Özel Sayı (204-211).

“

BÖLÜM 10

**ÜRETİMDE BASKIN BİR PARAMETRE
HALİNE GELEN İŞ SAĞLIĞI VE
GÜVENLİĞİ (İSG) DİSİPLİNİ VE YENİ
YAKLAŞIMLAR**

Metin Uçurum¹

”

1 Prof. Dr., Bayburt Üniversitesi 0000-0002-0725-9344

1. GİRİŞ

Sanayi devriminden sonra insanoğlu üretimde daha iyiye gidebilmek için birçok çalışma ve gelişme ortaya koymuştur. Ancak üretimi etkileyen parametrelerin optimizasyonu oldukça zor bir süreç olması nedeni ile bu zaman almıştır. Günümüz dünyasında işletmelerin en önemli hedeflerinin üretimi sürekli kılmak, *verimliliği artırmak*, *maliyeti azaltmak* ve rekabet edebilirliği korumak olduğu bilinmektedir. Ancak üretimde süreklilik, kalite, verim modern makine-ekipman-proses ile uzman çalışanların bir araya gelmesi ile oluşturulabilen bir süreçtir. Bununla birlikte günümüz iş dünyasında bu sürece iş sağlığı ve güvenliği (İSG) çalışmalarının başa-rısı da eklenmiş durumdadır. Üretimi iyileştirme çalışmaları içinde bütün teknik ve sosyal parametrelerin yanında ve içinde yer alan İSG sürdürülebilir bir kalkınma için vazgeçilmez hale gelmiş multidisipliner bir bilim dalıdır. Bu nedenle, işletmeler herhangi bir üretim sürecinin planlanmasında iş sağlığı ve güvenliğini de dikkate alarak planlamalarını yapmak zorundadır.

Teoride bilindiği üzere üretim süreçlerinde doğabilecek aksaklıkları ve çıkabilecek problemleri minimum seviyeye indirmek üretimin sürekliliğini sağlamaktadır. Ancak üretim prosesleri teknik olarak kusursuz bir mühendislik ile planlanmış olsalar dahi beklenmedik problemler üretimin aksamasına ve durmasına neden olabilmektedir. Söz konusu beklenmedik problemlerin ana kaynaklarından bir tanesi de iyi planlanmamış ve kurgulanmamış İSG hata ve eksiklikleri olduğu yaşanan tecrübelerle sabittir. Bu nedenle, iş sağlığı ve güvenliğinin üretimin ana parametrelerinden birisi olduğu günümüzde tartışmasız bir gerçeklik haline gelmiştir.

Üretim sahalarında yanlış bir yaklaşım olarak kabul edebileceğimiz İSG sadece çalışanları korur düşüncesi ve uygulamaları teknik olarak doğru değildir. Elbette İSG'nin önceliği çalışanları korumaktır ancak bununla beraber işletmenin kendisi başta olmak üzere var olan bütün makine-proses, hammadde, alet, edevat, vs.'yi korumakta iş sağlığı ve güvenliğinin başlıca görevleri içinde yer alır. Et ile tırnak birbirinden ayrılmaz atasözünde olduğu gibi Çalışanla-Çalışma Ortamı birbirinden ayrı düşünülemez.

2. İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG)

İş sağlığı ve güvenliğinin tarihsel gelişimi Şekil 1'de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde İSG tarihi için Dünya da sanayi devriminin baz alınarak bir sınıflandırılmaya gidildiği görülmektedir. Bu durum iş sağlığı ve güvenliğinin (İSG) hangi bilim dalı altında olması gereken bir disiplin olduğunun da bir göstergesi kabul edilmelidir. Çünkü günümüzde multidisipliner bir yapıya sahip iş sağlığı ve güvenliğinin sağlık bilimlerine ait

bir disiplin olduğu iddia ediliyor olduğu görülmektedir. Genel olarak çalışma alanlarını sağlık-mühendislik-sosyal alanlar olarak kabaca üç gruba ayırdığımızda İSG'nin temel kullanım alanının mühendislik çalışma alanları olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır. Bu nedenle İSG'nin mühendislik disiplininin bir parçası olduğu kabul görmesi gereken bir gerçekliktir. Bunu söylerken sağlık ve sosyal çalışma alanlarında iş sağlığı ve güvenliği kullanılmamaktadır anlamı çıkarılmaması gerekmektedir.



Şekil 1. İSG'nin tarihsel gelişimi [1].

Literatür çalışmaları incelendiğinde iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili birçok tanımın paylaştığı görülmektedir. Ancak günümüz çalışma dünyası için İSG kavramın basit bir anlatımla “çalışanların iş yerinde maruz kalabilecekleri fiziksel, kimyasal, biyolojik, psikolojik vb. çalışma ortamı risklerini ortadan kaldıran veya minimize ederek sürekli kontrol altında tutan, çalışanların güven içinde üretimlerini gerçekleştirmelerini ve çalışma hayatlarını sağlıklı, huzurlu bir şekilde sürdürmelerini sağlayan bilimsel tabanlı multidisipliner çalışmaların bütünüdür.”

İş sağlığı ve iş güvenliğinin üç temel amacı bulunmaktadır:

- 1- Çalışanların korunması
- 2- İşletmenin korunması
- 3- Üretimin korunması [2].

Yukarda sıralanan ve işletmelerde iş sağlığı ve güvenliğinin hizmet ettiği üç temel alandan birincisi olan çalışanların korunması klasik ve bilinen İSG çalışma alanını vermektedir. Burada öne çıkarılması gereken ikinci ve üçüncü maddelerde yer alan işletmenin ve üretimin korunmasıdır. İşletmenin korunması başka bir deyimle fabrikanın korunması aslında çalışanların ve üretimin korunmasını da kapsayan bir maddedir. İşletmenin korunması içerisine fiziki yapısının zarar görmesinin önlenmesi için

yapılan iş sağlığı ve güvenliği çalışmaları şeklinde anlaşılmasının yanında işletmenin üretim hayatının devam ettirilmesi için kaliteli ve verimli üretimden rekabet edebilir kurumsal bir yapının kazandırılmasına kadar çok geniş bir çerçevede değerlendirilebilecek bir maddedir. Üretimin korunması ise bu yazının ana temasını teşkil etmektedir.

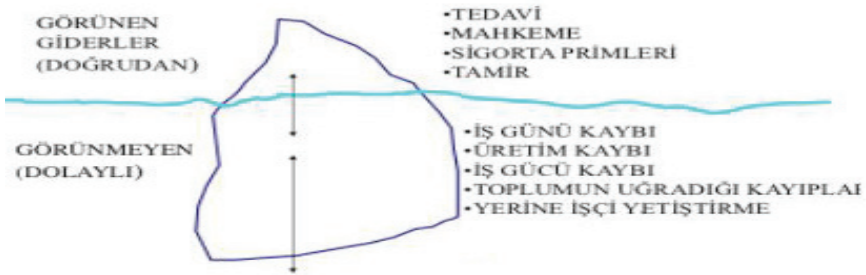
1919 yılında Birleşmiş Milletler (BM) bünyesinde kurulan daha sonra bağımsız bir kuruluş haline gelen Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) ile yine BM bünyesinde 1945 yılında kurulan Dünya Sağlık Örgütü (WHO) dünya ülkelerinin çoğu ile sözleşmeleri olan ve bu ülkelerdeki çalışma hayatı ile ilgili düzenlemelerde rol oynayan denetleme yetkisine sahip uluslararası kuruluşlardır. Ülkelerinin çoğunda ücret eşitsizliğinden istenilen çalışma ortamının sağlanamamasına varıncaya kadar iş sağlığı ve güvenliği alanında birçok eksiklikler kendisini göstermektedir. Bunun tabii bir sonucu olarak da iş kazaları ve meslek hastalıklarının istenilen seviye ye çekilememesi gelmektedir. İş sağlığı ve güvenliğinde genel bir yaklaşım olarak iş kazalarının sadece %2'sinin önlenemeyeceği %98'lik bir oranın ise önlenebileceği şeklindedir. Özellikle insan kaynaklı iş kazalarının %88'lik paya sahip olduğu %10'luk dilimde ise ortam faktörlerinin söz konusu olduğu bilimsel bir gerçektir. İş kazalarının başlıca nedenleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1 incelendiği zaman fiziksel unsurlar, kişisel unsurlar, fizyolojik, psikolojik ve sosyal unsurların içerisinde doldurulduğu görülmektedir. Fiziksel unsurlar içerisinde yoğunlukla çalışma ortamı ile ilgili parametrelere yer verilirken diğer iki unsurun içinde ise çalışan özelliklerinin ön plana çıktığı dikkati çekmektedir. Bu durumda yukarıda belirtildiği üzere iş kazalarının büyük bir çoğunluğu Çalışan ve Çalışma ortamı kaynaklı olduğunu ispatlamaktadır. Yani düzeltilebilir-iyileştirilebilir bir süreçten bahsedilmektedir. İnsan özellikle eğitim ile ortam özellikleri ise iyi bir planlama ile değiştirilebilir ve ideal şartlara teorik olarak ulaşılabilir olduğunu görmek gerekmektedir.

Çizelge 1. İş kazalarının nedenleri [3, 4]

Fiziksel Unsurlar	İşıklandırma, Isı ve Nem, Gürültü, Havalandırma, Makine ve Teçhizat, İşyerindeki Çevre Düzeni, Çalışma Saatlerinin Uzunluğu, İş Çevresinde Kullanılan Renkler.
Kişisel Unsurlar	Yaş, Hizmet Süresi (Kıdem), Eğitim ve Bilgi Düzeyi, Cinsiyet, Medeni Durum.
Fizyolojik, Psikolojik ve Sosyal Unsurlar	Algılama Farklılığı, Fiziksel Eksiklik, Yorgunluk ve Uykusuzluk, Zekâ Düzeyi, İş Tatmini, Stres, Alkol ve Uyuşturucu Bağımlılığı, Ruhsal Hastalıklar, Kaygı, Öfke.

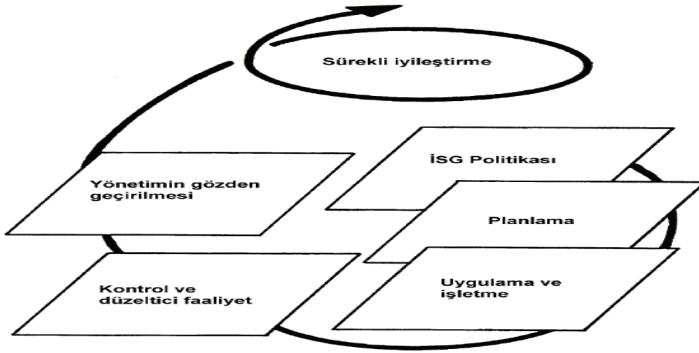
İş sağlığı ve güvenliğinin çalışma alanlarından bir tanesi de iş kazaları ve meslek hastalıkları neticesinde ortaya çıkan maliyetlerin analiz edilerek ortaya konulmasıdır. Bu maliyetler literatürde klasik bir gösterim haline gelmiş buz dağı (iceberg) şekli ile ifade edilmektedir (Şekil 2). Burada görünen ve görünmeyen maliyetler olmak üzere iki yaklaşım kullanılmaktadır. Görünen maliyetler bütün kazalarda ve hastalıklarda ortaya çıkan bilindik maliyetlerdir. Ancak İSG kaynaklı olumsuzluklarda açığa çıkan maliyetlerde üzerinde durulması gereken görünmeyen maliyetler olarak isimlendirilen ve kümülatif yaklaşımla değerlendirilmesi gereken mali kayıplardır. Basit bir örnekle ifade etmek gerekirse bir ülkede iş kazaları nedeniyle bir yılda toplam iş günü kaybı 1.000.000 gün olsun buradan anlaşılması gereken o ülkede bir milyon gün kadar üretim ertelenmiş yani yapılamamış demektir. Takdir edileceği gibi sadece üretimden kaynaklı maddi kayıplar çok ciddi bir boyutta ulaşacak ve bununla birlikte de buz dağının 1/3'ünü oluşturan görünür maliyetler ve 2/3'ünü oluşturan görülmeyen maliyetler başlığı altındaki diğer kayıpları da dâhil edildiği zaman İSG kaynaklı mali olumsuzlukların boyutu ortaya çıkarılmış olacaktır. Genel ve somut bir ifade ile söylemek gerekirse ortalama olarak iş sağlığı ve güvenliği kaynaklı kayıpların ülkelerin Gayri Safi Milli Hasılasının (GSMH) %4 gibi yüksek bir oranına kadar ulaşabileceği yönündedir.



Şekil 2. Buzdağı teorisi [5]

İş sağlığı ve güvenliği (İSG) yönetim sistemi, işletmelerin, fabrikaların sağlık ve güvenlik sorumluluklarını gerektiği şekilde ve efektif olarak yerine getirmelerine yardımcı olacak şekilde kurgulanmalı ve geliştirilmelidir [6]. Günümüz iş dünyasında rekabet edebilirliğin temel unsuru haline gelen ve işletmedeki bütün çalışma alanlarının optimum olması yönündeki düzenlemelerin ve yaklaşımların ortaya konmasını “kurumsallaşma” olarak isimlendirmek mümkündür. İSG alanındaki kurumsallaşmayı kolaylaştıran ve denetleyen uluslararası mekanizma da İSG yönetim sistemleridir. Bunlardan TS18001 İSG Yönetim Sistemi modeli Şekil 3’de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde nihai amaç olan sürekli iyileştirmenin

parametrelerinden birisinin de İSG politikası olduğu belirtilmektedir. Bu da yerinde bir tespittir. Bununla birlikte görüleceği üzere vurgulanması gereken bir diğer husus da “sürekli iyileştirme” kavramının içinin doldurulması gerektiğidir. Bu kavram işletmelerde üretimin her alanında baskın bir anlayış olarak kendini göstermelidir. Zira rekabet edebilirliğin anahtarı bu yönetim anlayışında saklıdır.



Şekil 3. TS18001 İSG yönetim sistemi modeli [6, 7].

İş Sağlığı ve Güvenliğinin önemi gelişmiş ülkelerde 1900 yılların başından itibaren fark edilmeye başlanmış ve bu disiplin üzerine yapılan yasal çalışmalar, üretim sahalarındaki ve bilimsel alanlardaki ilerlemeler ivmesi artan bir şekilde günümüze dek iyileştirilerek getirilmiştir. Özellikle İLO’nun faaliyete geçmesi bu alanda dünya ülkelerinin bilincini artırmış ve çalışma hayatına büyük katkılar sağlamıştır. Gelişmekte olan ülkeler İSG konusuna 1970 yıllardan sonra eğilerek günümüze sürekli iyileştirme çabaları ile ulaşmışlardır. Ancak İSG’de temel unsur insan ve eğitimi olduğu için ve bu alanda bir kültürün oluşması gerekmektedir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse İSG’nin bir kültür olduğu gerçeğinden hareket edilmesi işimizi kolaylaştıracak bir yaklaşım olacaktır. Bunu ülkemizde yaşanan bir durum üzerinden açıklamak gerekirse 1997 yılından önce şehirlerarası otobüslerde sigara içmek serbest idi. Bu yılda çıkarılan bir kanun ile otobüslerde sigara içmek yasaklanmıştır. Kanunun ilk yıllarında bu yasaya direnç oluşmuş ve kanunu delme girişimleri yaşanmıştır. Ancak yıllar geçtikçe bu kanun insanlar tarafından benimsenerek uygulamada başarısı yüzde yüze ulaşmıştır. Günümüzde artık bu bir kültür değeri olarak insanlarda yer etmiş ve otobüslerde sigarasız hayat istisnasız devam etmektedir.

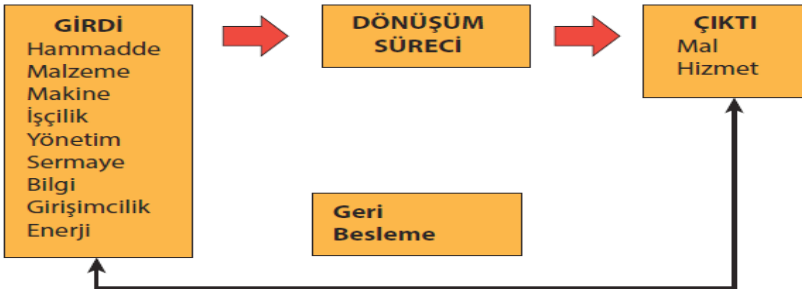
İş sağlığı ve güvenliğinde de yukardaki örnekte olduğu gibi özellikle gelişmekte olan ve az gelişmiş ülkelerde İSG kanun yordamı ile iyileştirilmeye çalışılmakta ancak bu sekmen aşıldıktan sonra kültürel bir değere

ulaşacağı ön görülmektedir. Bu aşamadan sonra iş sağlığı ve güvenliği çalışanların sahipleneceği ve talep edeceği bir değer haline gelecektir.

3. Üretim

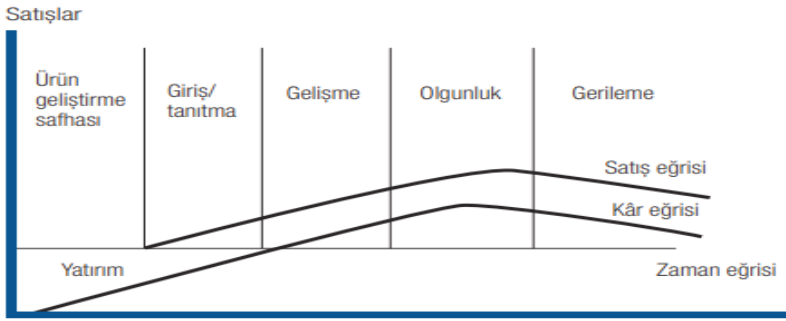
Genel bir yaklaşımla 1900 yıllara kadar Dünyanın hemen hemen hepsinde tarım üretimi başı çekmiştir. Daha sonraki dönemlerde ise tarım üretimi devam etmekle birlikte sanayi üretimine insanoğlu adım atmıştır. Üretimin insanoğlunun tarihinde oldukça eski bir yeri olması ile birlikte günümüz dünyasında yeni yaklaşımlar ortaya konularak insanoğlunun üretim serüveni devam etmektedir.

Şekil 4’de üretim sisteminin genel yapısı sunulmuştur. Üretim sisteminde de yer alan girdi, süreç ve çıktı sistemin temel elemanları olup üretim sisteminin girdileri içinde zikredilen parametreler (ham madde, malzeme, makine, işçilik, vd.) mal ve hizmete dönüştürülmektedir [8]. Söz konusu şekil incelendiği zaman üretimde yer alabilecek parametrelerden yönetsel ve teknik detayların özetle verildiği görülmektedir. Üretim sürecinde girdiler kısmında Yönetim başlığının açılmasında fayda olacaktır. Zira bu parametrenin içinde İSG olduğunun vurgulanmasına ihtiyaç vardır. Bilindiği üzere işletmelerde iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarının başlangıç noktasının yönetim departmanı olduğu bir gerçektir. Çünkü “balık baştan kokar” atasözünde olduğu gibi yönetim kadrosunun İSG anlayışında sıkıntı olması durumunda işletmelerde iş kazaları ve meslek hatalıkları konusunda sürekli problem yaşanacağı ve bunun sonucunun üretim hattına olumsuz yansıtacağı kaçınılmaz bir gerçekliktir. Aynı şekilde üst yönetimde yeterli iş sağlığı ve güvenliği bilinci söz konusu ise işletmenin İSG kaynaklı yaşayacağı olumsuzluklar minimum seviyeye inecektir. Bununla birlikte söz konusu şeklin girdiler kısmında verilen “Bilgi”nin içerisine de iş sağlığı ve güvenliğinin yerleştirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Çünkü İSG bir “kültürel davranış” ise bu da ancak eğitim ve bilgi ile elde edilebilecek bir olgudur.



Şekil 4. Üretim sistemi [8]

Ürün yaşam eğrisi, ürünün satış tarihçesini daha anlaşılır ve pratik olarak göstermek amacı ile çizilen bir şekil olup (Şekil 5) dört temel aşamadan oluşur. Bunlar; giriş (sunuş-tanıtma), gelişme, olgunluk ve gerileme dönemidir [9]. Şekil 5 ürün ömür eğrisini vermektedir. Burada üzerinde durulması gereken ürünlerin mi bir ömrü vardır yoksa ürün modellerinin mi sorusunun cevabıdır. Örneğin bir cep telefonun fiili ömrü 5 yıl ise bu süreç sonunda aynı telefon markasının yeni modeli hayata geçmektedir. Artık günümüzde özellikle elektronik eşyalar ve arabalar gibi ürünlerin Model ömürleri söz konusu hale gelmiş olduğu gözlenmektedir.



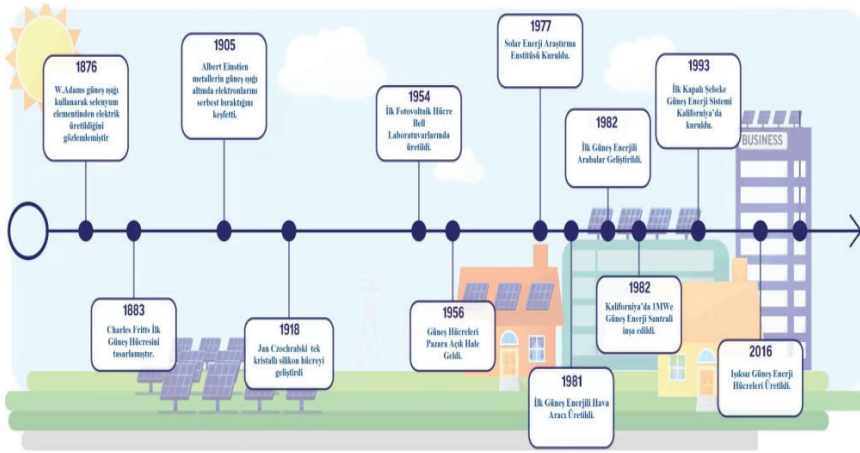
Şekil 5. Ürün yaşam eğrisi evreleri [9].

İnsanlık tarihine bakıldığında zaman bir ürünün elde edilmesi ve geliştirilmesi çok uzun yıllar almış ve gelişimi durmamıştır bu gerçeği anlatmak için Şekil 6'da güneş enerjisi sistemlerinin üretiminin tarih içinde değişimini gösteren bir görsel paylaşılmıştır. Bu örnek incelendiğinde zaman üretimin kümülatif bir sonuç olduğu ortaya çıkmaktadır. Yani geçen yıllar ürünlerin ortaya çıkmasına ve gelişmesine imkan sağlamaktadır.

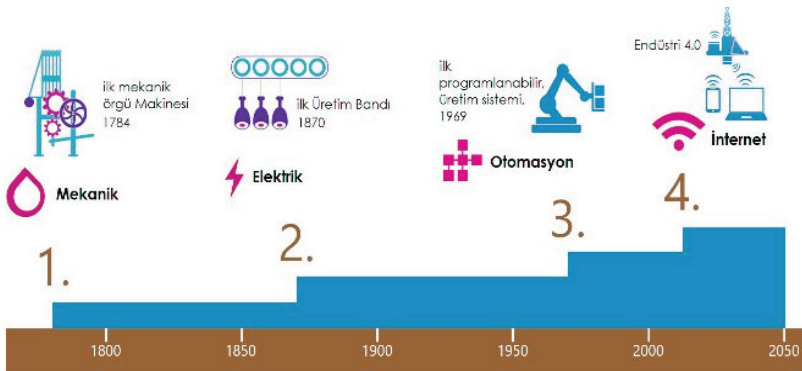
Bugün üretimde geline son aşama olarak gündeme gelen ve bir Alman yaklaşımı olan Endüstriyel 4.0 yani 4. Sanayi Devrimidir (Şekil 7). Bu devrimde amaç; üretimin bütün aşamalarında bilişim teknolojilerinin kullanılmasının sağlanmasıdır. Bu sayede daha hızlı daha ucuz ürünlerin elde edilmesinin yolu açılmaktadır.

Bilindiği üzere teknolojiye en fazla etkilenen ve yararlanan alanların başında üretim gelmektedir. Özellikle köklü uluslararası firmaların kısa tarihleri incelendiğinde teknolojiyi ve AR-GE'yi önceleyen bütün işletmelerin ömürlerinin uzun olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni ise yukarıda sayılan iki yaklaşım sayesinde rekabet güçlerini sürekli iyileştirmeleri ve canlı tutmalarıdır. Bu noktada üretimin modernleşmesinin, iş sağlığı ve güvenliğine yansımalarını da konuşmak gerekmektedir. Elbette her sanayi devrinin özelliklerine göre iş kazası ve meslek hasta-

lıkları tipleri değişkenlik göstermiştir. Örneğin 1. Sanayi devriminde daha çok mekanik ve manuel makinelerin kullanılması nedeni ile iş kazalarının makinelerle el-kol kaptırma gibi çok ağır kazalar söz konusu olmuştur. Bu devrimden sonra yavaş yavaş otomasyon bazlı üretimin yolu açılmış ve bu süreç 3. Sanayi devriminde kendisini göstermeye başlamıştır. Bu pencereden bakıldığında özellikle otomasyon yani yarı robotik ve robotik üretimler iş kazalarında en dominant rolü oynayan insan faktörünü minimize etmekte dolayısı ile de iş kazalarını ve meslek hastalıklarının trendini aşağı yöne çevirmektedir. Bununla birlikte İSG ölçümlerinin çok daha modern aletlerle sürekli yapılabiliyor olması yine İSG mühendislerine teknolojinin sağladığı imkân ve fırsatlar açısından çok önemlidir.



Şekil 6. Güneş enerjisinin tarihsel gelişimi [10]



Şekil 7. Endüstriyel 4.0'ın kronolojisi [11]

4. İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİNİN (İSG) Üretimdeki Yeri ve Önemi

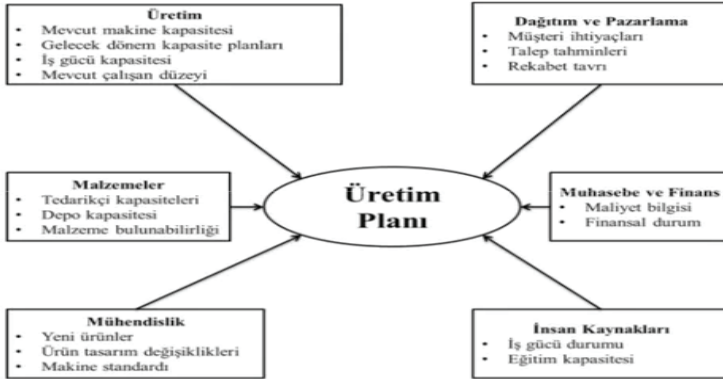
Amerikalı bir psikolog Abraham Maslow tarafından 1943 yılında ortaya konmuş bir çalışma olan Maslow'un ihtiyaçlar hiyerarşisi bir insan psikolojisi teorisidir [12]. Maslow'un ihtiyaçlar hiyerarşisi genel olarak insanoğlunun yaradılıştan bu yana ihtiyaç duyduğu temel ihtiyaçları sıralamaktadır. İş ve çalışma olgularının baskın hale geldiği günümüzde bu ihtiyaçların revize edilmesine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Zira söz konusu hiyerarşi içerisinde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) yoruma bağlı olarak örtülü bir şekilde güvenlik ihtiyacı içerisinde zikredilebilir ancak tahmin edileceği üzere Maslow'un ihtiyaçlar hiyerarşisinde (Şekil 8) kastedilenin klasik "Güvenlik" olduğu aşikârdır. Bu nedenle, söz konusu ihtiyaç hiyerarşisindeki Güvenlik İhtiyacı basamağına iş sağlığı ve güvenliğinin de (İSG) eklenerek revize edilmesinin günümüz insanları için daha uygun olacağı düşünülmektedir. Çalışma hayatı, fiziksel ihtiyaçları, sosyal ihtiyaçları saygı ihtiyacını ve kendini gerçekleştirme ihtiyacının karşılanabildiği en önemli adres olarak günümüzde yalın bir şekilde karşımızda durmaktadır. Bu adreste yaşanacak bir problem Maslow'un ifade ettiği ihtiyaç listesinin hepsini olumsuz olarak etkileyecektir. Bu bağlamda iş yerinde kişiye ve işe dönük yaşanabilecek potansiyel tehlikeler ancak iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarının uygulanması ile minimize edilebileceğinden söz konusu hiyerarşinin bir yerlerinde İSG'nin yer alması gerekliliği açıkça görülmektedir.

Müşteri kalite beklentilerindeki artış, rekabetin dünya ölçeğine taşınması, hammadde, finansal zorluklar vb. parametreler üretim süreçlerinin ve yöneticilerin işlerini giderek zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte gelişen teknoloji, hızlı ve farklı iletişim ağları gibi faktörler ise olumlu yönde etkilemektedir. Üretim süreçlerinin bir parçası konumuna gelmiş olan iş sağlığı ve güvenliği (İSG) ise ortada duran bir olgudur. Zira işletmelerde uygulanan iyi bir İSG, üretim sürecini ve hızını olumlu yönde etkilerken, kötü uygulanan İSG ise işletmelerde üretimin fasılalı olarak yapılmasına veya durmasına sebep olmaktadır.



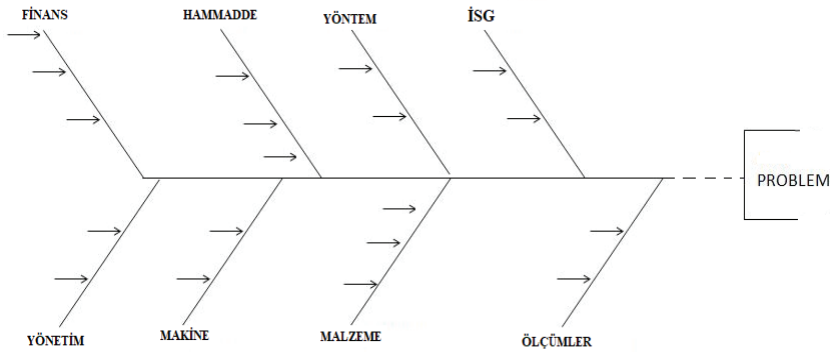
Şekil 8. Maslow'un ihtiyaçlar hiyerarşisi [13]

Üretim planlamasında işletmelerin bütün birimleri için kullanışlı ve efektif bir plan oluşturmak için bilgi girdilerinin sağlanması gerekmektedir. Şekil 9'da her bir fonksiyon alanından gelen girdiler özetlenmiştir [14]. Bununla birlikte hammadde, enerji vb birçok kaybı beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenle Şekil 9'da verilen ve üretim süreçlerine direk etki eden fonksiyonel alanlardan üretim planlarına kadar yönetsel girdi parametrelerinin başlıcalarının sıralandığı etkenlerin içine iş sağlığı ve güvenliğinin de (İSG) dâhil edilerek revize edilmesine ihtiyaç olduğu kanaati taşınmaktadır. Zira artık kanuni olarak da kültürel olarak da üretim planı yapılırken İSG çalışmaları ve yatırımlarının yapılması kaçınılmazdır. Bu çalışmanın kanunların yaptırım gücünün kullanılarak yapılmasından ziyade daha değerli olan üretim süreci planlayanların İSG'yi önceleyerek ve isteyerek yapmalarıdır. Bu durumun oluşması ise takdir edileceği üzere kültürel bir sorundur. İSG konusunda kültürel değerlerini kazanmış çalışanlar tarafından planlanan ve uygulanan üretim süreçlerinin dominat bileşeninin iş sağlığı ve güvenliği olduğu özellikle gelişmiş ülkelerde dikkat çeken bir durumdur.



Şekil 9. Fonksiyonel alanlardan üretim planlarına kadar yönetsel girdiler [14, 15]

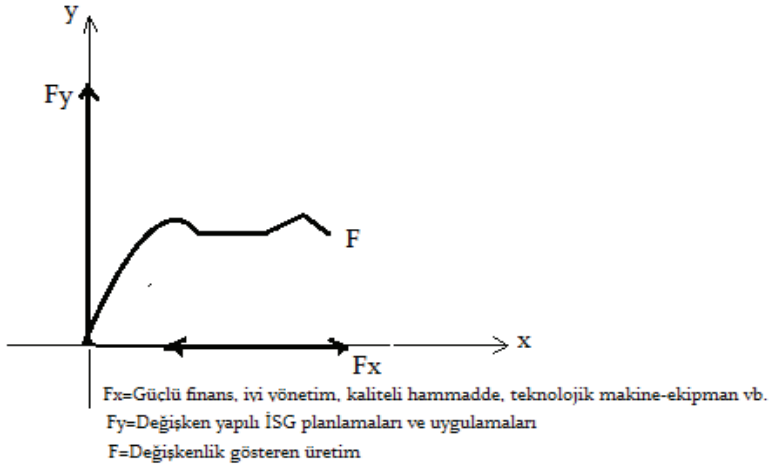
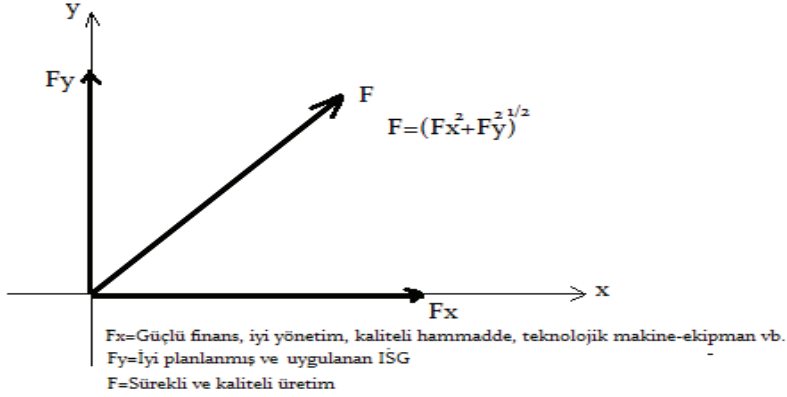
Kalite çalışmalarında “Balık Kılıcı Diyagramı” yöntemi olarak bilinen yaklaşım bir problemin tüm olası parametrelerini ve aralarındaki korelasyonu ortaya koyan bir çözüm tekniğidir. İşletmelerde meydana gelen sorunların kalıcı bir şekilde çözümünü veya ortaya çıktıkça çözümünü kolaylaştıran bu teknik oldukça faydalı bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem problemi bulma konusunda araştırmacıya bir metot öğretmek sureti ile sorunlar oluştuğunda hızlı ve ucuz çözümünü sağladığı bilinmektedir. Üretim; genel olarak insan, finans, yönetim, hammadde, makine, malzeme, yöntem, ölçümler, kalite kontrol vb. bazı parametreleri içinde barındırır. Bu etkenlerin içerisine bu yazımızda vurgulamaya çalıştığımız üzere İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) disiplini de etkin rol oynayan parametreler içerisinde göstermek gerekmektedir. Bu bağlamda Şekil 10’da bazı üretimin bileşenlerini içeren Balık Kılıcı çizimi verilmiştir. Her alandaki üretimin farklılıklar içereceği düşünülerek balık kılıcındaki ana unsurların alt başlıkları boş bırakılmıştır.



Şekil 10. Genel bir yaklaşımla üretim bileşenlerini içeren Balık Kılıcı örneği

Üretim bileşenlerinin bir vektör yaklaşımı ile de açıklanabileceği de düşünülmektedir. Üretimde rol alan parametrelerden finans, yönetim, hammadde, makine, malzeme, yöntem vb. gibi değişkenlerin kuvvetli olması yani “güçlü, iyi, teknolojik” gibi kavramlarla ifade edilmesi durumunda vektör mantığında bu parametrelerin toplam etkisine F_x dersek ve iyi planlanan ve uygulanan İSG’de F_y olarak kodladığımız zaman basit vektör bileşeni yaklaşımından F ’ye yani sürekli ve kaliteli üretime ulaşmamız kaçınılmaz hale gelecektir (Şekil 11a). Söz konusu şekilde de verilen formülden de anlaşıldığı üzere F_x ve F_y büyüdükçe F değerini de büyütmektedir. Şekil 14b’de ise durum biraz iyi planlanmamış ve uygulanamayan İSG nedeniyle farklı bir durum anlatılmaya çalışılmıştır. Üretimin ana unsurlarını ifade eden F_y ne kadar iyi olursa olsun bu iyile-

re gölge düşürme potansiyeline sahip iş sağlığı ve güvenliği problemleri üretimin sürekli ve kaliteli olmasında negatif yönde baskısı oluşturan bir olgu olarak her zaman karşımıza çıkacaktır. Bu nedenle iyi planlanmayan ve kontrol altında tutulamayan İSG riskleri, her zaman iyi üretimi baskılar bir pozisyonda konumlanacaktır.



Şekil 11. Basit vektör anlayışı ile üretim parametreleri ve İSG ilişkisi

1970'lerden sonra çok disiplinli (mühendislik, sağlık, ekonomi, hukuk) bir yapıya sahip iş sağlığı ve güvenliği multidisipliner bir karakterde bir bilim dalı olarak ortaya çıkmış ve gelişmiş ülkeler bu alanda gerek kanuni açıdan gerekse kültürel açıdan çok hızlı bir yol katedilmiştir. Bunun karşılığı olarak daha az iş kazası ve meslek hastalığı ile başta kendi insanlarını koruyarak İSG kaynaklı problemlerin ekonomilerine daha az zarar vermesini başarmaya çalışmışlardır. Buradan çıkarılması gereken

ana sonucun gelişmekte olan ve özellikle gelişmemiş ülkelerde iş sağlığı ve güvenliğinin alt yapısının yani kanuni çalışmaların ve kültürel eğitimin ülke yöneticileri tarafından öncelenmesi gerektiğidir.

Yukarda verilen bilgiler irdelendiği üretimin ve iş kazalarının ana unsurun insan olduğu vurgusu vardır. Eğer bir işletmede çalışanların çalışma ve üretme arzusu ne kadar üst düzeyde tutulursa o denli verimli bir üretimin yapılacağı bir gerçektir. İnsanların bu arzularının sürekli dinamik tutulabilmesi için elbette işletme tarafından bazı şartların yerine getirilmesi gerekmektedir. Bu şartların başında aklımıza hemen ücret gelmektedir elbette bu doğru bir düşünce ve tespittir. Ancak burada irdelenmesi gereken ücret parametresinin kendi başına çalışanlar için yeterli olup olmadığıdır. En basit yaklaşımla ücret iyi iken çalışma ortamı, yemek, izin, amirin tutumu vb. etkenlerin kötü olması çalışanın ücretin iyi olması motivasyonunu sorgular hale gelmesinin yolunu açacaktır. Özellikle de can güvenliği ve sağlığı ile ilgili olumsuzluklar bu durumu baltalayan en önemli insani düşüncedir. Bu nedenle bir iş yerinde üretimin ve verimin iyi olması ve devamlı olması isteniyor ise İSG çalışmalarının öncelenmesi gerekmektedir.

Genel bir yaklaşımla üretim sahalarında verimli bir çalışma demek üretimin istenilen kalite, fiyat ve miktar aralığında tutmak anlamında basitleştirmek mümkündür. Bunlardan kalite, kullanılan hammadde, makine, proses ve çalışan kalitesi vb. bileşenlere sahiptir. Ancak bilindiği üzere kalite kavramı kompleks bir yapıya sahip olup bu sayılanlar buz dağının görünen kısmıdır. Görülmeyen kısmında var olan en önemli parametrelerden birisi de iş güvenliğidir. İş kazaları nedeni ile fasıllı çalışan bir işletmeden sürekli aynı kalitede ürün eldesi teknik olarak mümkün değildir. Bu işletmenin arz güvenliğini riske atarak müşterilerinde kaliteli ve zamanında ürün teslim alması noktasında kaygıların gelişmesine neden olacaktır.

Ürün fiyatına gelince iş sağlığı ve güvenliği (İSG) için yapılan yatırımlar İSG kaynaklı olumsuzlukların maliyeti yanında küçük bir oran olarak değerlendirmek gerekir. Bir kalem ürüne İSG yatırımı nedeniyle 1 birim maliyet binerse iş kazaları ve meslek hastalıkları temelli olumsuzlukların maliyetinden kaynaklı bu değer en az 3 birim olacaktır. Günümüzde gerek şahısların gerekse işletmelerin bir firmadan ürün almayı planladıklarında en önemli talepleri ürünün istenilen kalitede ve miktarda ve zamanında teslim edilip edilmeyeceğidir. İşletmelerde İSG kaynaklı yaşanacak üretim duruşları istenilen miktarda ürünün üretilmesinde ve tesliminde engel çıkartacak en önemli negatif durumlardandır.

5. SONUÇ

Üretim insanların hatta canlıların hayatını sürdürmesi ve kolaylaştırması için yürütülen bütün faaliyetleri içine alan çok geniş bir kavramdır. Emek, sermaye, girişim, vb. üretimin temel faktörlerini oluşturur. Ancak insanoğlu var olduğundan günümüze kadar her dönemde bir şekilde üretimin içinde olmuş ve bu süreç yeni üretim parametrelerinin devreye girmesi ile gidererek daha karmaşık bir hal almıştır. Üretim denen kavramın kaliteyle birleştirilmesi kaçınılmaz bir gerçektir. Buna ilave olarak talebi karşılamak için gerekli üretimin yapılması işletme ürünlerinin tutundurulması için elzemdir. Üretim yapılırken bunun verimi hem üretim maliyeti ile hem de ürün kalitesi ile ilişkilendirilmesi ve buna göre alt yapı hazırlanması gerekmektedir. Bu alt yapının içinde kurumsal bir iş sağlığı ve güvenliği (İSG) departmanının da bulunması gerekmektedir. Sadece kanunların ön gördüğü yaptırımların yanında gönüllük ve kültür bileşenlerinin de ortaya konularak işletmeler İSG alt yapılarını, vizyonlarını ve misyonlarını ortaya koymalıdır. Temel olarak bakıldığında İSG kısa vadede bir harcama kalemi olarak görülse de uzun vadede işletmenin rekabet edebilirliğini ve sürekli ürün üretebilirliğini ve ürün geliştirebilirliğini destekleyen en önemli çalışma ve yatırımların başında gelmektedir. Zira iyi, kaliteli ve en önemlisi sürdürülebilir üretimin saç ayaklarından birisi artık iş sağlığı ve güvenliğidir.

KAYNAKLAR

- [1] Yaşar, G.Y., Karadoğan, E., İş Sağlığı ve Güvenliğinin Tarihsel Gelişimi, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/63422/mod_resource/content/1/4.%20Ders%20%20-%20D%C3%BCnyada%20Tarihsel%20Geli%C5%9Fim.pdf
- [2] Akıllı, H., Aydoğdu, Ö. (2013). İş Sağlığı ve Güvenliğinin Önemi, *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, Sayı 16, 245-250.
- [3] Ünsar, A.S. (2003). *Türkiye’de İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Uygulamalarının Mevcut Durumu ve Konuyla İlgili Yapılan Bir Araştırma*” İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayınlanmamış Doktora Tezi, İstanbul, 2003, s.43.
- [4] Ünsar, A.S. (2004). İş Kazaları ve Örgütsel Verimlilik, *Verimlilik Dergisi*, Sayı 3, 89-101.
- [5]. Okcu, G., (2021). *Etibakır A.Ş. Küre Yeraltı İşletmesinde Yüksekte Yapılan Çalışmalarda İş Sağlığı ve Güvenliği*, T.C. Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı
- [6] Güngör, S., Çuhadar M.T. (2015). İş Güvenliği ve Sağlığı Yönetim Sistemi. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 5,2, 44-59.
- [7] TS 18001, (2008), İş Sağlığı ve İş Güvenliği Yönetim Sistemleri, Türk Standartları Enstitüsü – TSE, ss.2-13.
- [8] Kağncıoğlu C. H., (2018). *Üretim Yönetimi*, T.C. Anadolu Üniversitesi Yayını No: 2584.
- [9] Ötleş, S., Biber, Y., (2018). Ürünlerin Yaşam Evreleri Pazarlama Stratejileri, *Dünya Gıda Dergisi*, s. 92-97.
- [10] <https://www.myenerjisolar.com/tarihsel-olarak-fotovoltaik-sistemlerin-gelismisi/>
- [11]<https://www.stendustri.com.tr/endustri-40-uygulamaları/endustri-40-nedir-h95384.html>
- [12] https://tr.wikipedia.org/wiki/Maslow_teorisi
- [13] <https://www.psikonot.com/ ihtiyaclar-hiyerarshisi/>
- [14] Ekmekci, N. (2015). *Sanayi İşletmelerinde Üretim Planlaması ve Doğrusal Programlama ile Bir Sanayi İşletmesinde Optimizasyon Uygulaması*, T.C. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı Üretim Yönetimi ve Pazarlama Bilim Dalı
- [15] Krajewski, L., Ritzman, J., Larry P., Malhotra, M.K. (2013). *Operations Managemen: Processes And Supply Chains*. Üretim Yönetimi: Süreçler ve Tadarik Zincirleri. Çeviri Editörü: Semra Birgün. 9. Baskıdan Çeviri. Nobel Akademik.

“

BÖLÜM 11

MODERN DERİN ÖĞRENME TABANLI NESNE ALGILAMA MODELLERİNİN İNCELENMESİ

Ömer KAYA¹

Muhammed Yasin ÇODUR²

”

¹Arş. Gör., Erzurum Teknik Üniversitesi

ORCID ID: 0000-0003-1037-5546

² Doç. Dr. Erzurum Teknik Üniversitesi – American University of the Middle
Eas, ORCID ID: 0000-0001-7647-2424

1.Giriş

Nesne algılama süreci insanlar için önemsiz bir görev olarak nitelendirilmektedir. Olağan dışı bir durum olmadığı sürece bir insanın doğduğu andan birkaç ay sonra nesneleri algılamaya, tanımaya ve sınıflandırmaya başlayabilmektedir (Zaidi vd., 2022). Ancak bu özelliği bilgisayara öğretmek son on yıla kadar oldukça zor ve mucizevi bir görevdi (Sultana vd., 2019). Özellikle 2012 yılından itibaren yeni bir nesne algılama dünyası meydana gelmiştir. Gerçek dünyada var olan sorunlar çözüm önerilerine ihtiyacı doğurmaktadır. Artan nüfus, hareketlilik, suç işleme oranı gibi unsurlar kontrol mekanizmalarının otomatikleştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Ayrıca gelişen otonom sürüş teknolojileri de nesne algılama sürecinin hızlanmasına büyük katkı sağlamıştır.

İlk nesne algılama modelleri, Viola-Jones dedektörü (Viola ve Jones, 2001), Yönlendirilmiş Degradelerin Histogramı (Histogram of Oriented Gradient (HOG)) (Dalal ve Triggs, 2005) vb. gibi el yapımı özellik çıkarıcılardan oluşan bir topluluk olarak oluşturulmuştur. Genel olarak bu modellerin performansının kötü olmasıyla birlikte yavaş ve hatalı sonuçlar vermekteydi. Evrişimli sinir ağlarının (CNN) yeniden tanıtılması ve görüntü sınıflandırması için derin öğrenmenin kullanılması ile nesne algılamanın serüveni değişmiştir.

2012 yılında AlexNet (Krizhevsky ve Hinton, 2012) ile başlayan nesne algılama yolculuğu her geçen gün daha da güçlenerek devam etmektedir. Günümüzde nesne algılama, sürücüsüz arabalardan, kimlik algılamadan, güvenlik ve tıbbi kullanımlara kadar uygulama alanı bulmaktadır. Bu durum araştırmacıların sürekli olarak kendilerini güncel tutmasını zorunlu kılmaktadır. Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte bu alanda yapılan araştırmalar yeni araç ve tekniklerin hızla gelişmesine üstel bir katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla son dönemlerde sıklıkla kullanılan nesne algılama yöntemleri bu çalışmada ele alınmıştır. Genel olarak bu çalışma derin öğrenme tabanlı nesne algılayıcıları ve hafif sınıflandırma mimarileri hakkında kapsamlı bir inceleme sağlar. Literatürde birçok mevcut ((Agarwal vd., 2018; Borji vd., 2019; Gauen vd., 2017; Huang vd., 2017; L. Liu vd., 2020; Zhao vd., 2019; Zou vd., 2019)) incelemeler mevcuttur. Bu incelemeler oldukça ayrıntılı olsa da birçoğu iki yıl ve daha öncesi dönemlerde yayınlanmıştır. Bu durum yeni gelişmelerin gözden kaçmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla nesne algılama gibi sürekli kendini güncelleyen bir konuda yeni çalışmalar elzemdir. Bu çalışmanın ana katkıları aşağıdaki gibidir:

i)Bu çalışma, tek aşamalı ve iki aşamalı ana nesne detektörlerinin derinlemesine bir analizini sunmaktadır.

ii)Modellerin ağ tasarımları, tasarımlarındaki değişiklikleri ve bu durumların ağ performansı üzerinde etkileri vurgulanmıştır. Ağ mimarileri şekilsel olarak sunularak nesne algılama ağ yapılarının kolayca anlaşılması hedeflenmiştir.

iii)Modeller arasında karşılaştırmalı veriler verilerek okuyucuların veya araştırmacıların seçeceği ağ modeli hakkında karar vermesine yardımcı olunacaktır.

Bu çalışmanın geri kalan kısmı aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. İkinci bölümde nesne algılama hakkında bilgiler verilmekle birlikte nesne algılama sürecinin tarihsel yapısı da sunulmaktadır. Üçüncü bölümde ise bir ve iki aşamalı nesne dedöktörlerinin ağ mimarileri açıklanmıştır. Bu ağ mimarilerin karşılaştırmalı analizi dördüncü bölümde verilmekle birlikte son bölümde çalışma çıktıları verilerek sonlandırılmıştır.

2.Nesne Algılama

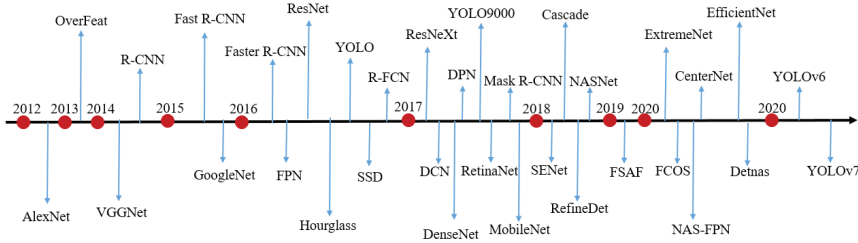
Video veya görüntülerdeki nesneleri birbirinden ayırt edebilmek, algılamak ve sınıflandırmak için kullanılan bilgisayarlı görme işlemi nesne algılama olarak isimlendirilmektedir. Bu işlem için birçok nesne algılama algoritmaları oluşturulmuş ve bunların temeli genellikle makine öğrenimi veya derin öğrenmeye dayanmaktadır. Nesne algılama algoritmaları yol güvenliğini sağlamak ve artırmak için araç-yol-yaya arasındaki bağlantıyı sürücü destek sistemleri ile artırmaya çalışması amacıyla ortaya çıkmıştır. Bu teknolojiyi oluşturma isteği nesne algılama yöntemlerine ihtiyacı doğurmuştur. Nesne algılamanın literatürde algılama bileşenleri, öğrenme stratejisi, uygulamaları gibi birçok farklı dizaynları var olup, detaylı bilgi aşağıda Tablo 1’de verilmektedir (Wu vd., 2020).

Tablo 1. Nesne algılama yöntemlerine ait bileşenler

NESNE ALGILAMA				
Algılama Bileşenleri			Öğrenme Stratejisi	Uygulamalar ve Kıyaslamalar
Algılama Ayarları	Algılama Paradikmaları	Omurga Mimarisi	Eğitim Aşaması	Uygulamalar
Sınırlayıcı kutu	İki aşamalı detektör	VGG,ResNet,DenseNet	Veri çoğaltma	Yüz tanıma
		MobileNet,ResNext	Dengesizlik örnekleme	
			Yerelleştirme iyileştirme	Yaya tanıma
Piksel maskeleme	Bir aşamalı detektör	DetNet, Hourglass Net	Kademeli öğrenme	Diğer
			Diğer	
Öneri Oluşturma		Özellik Sunumu	Test Aşaması	Genel Kıyaslamalar

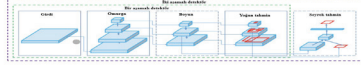
Geleneksel Bilgisayarla Görme Yöntemleri	Çok Ölçekli Özellik Öğrenme	Yinelenen Kaldırma	MSCOCO, Pascal VOC, Open Images
Anchor Tabanlı Yöntemler	Bölge Özelliği Kodlaması	Modeli Hızlandırma	FDDb, WIDER FACE
Keypoint Tabanlı Yöntemler	Bağılamsal Akıl Yürütme	Diğer	KITTI, ETH, CityPersons
Diğer Yöntemler	Deforme Özellik Öğrenme		

Derin öğrenme tabanlı nesne algılama işlemi yapmak için iki temel yaklaşım mevcuttur. İlk yaklaşım özel bir nesne detektörü oluşturma ve bunu eğitmek iken ikinci yaklaşım ise önceden eğitilmiş bir nesne detektörüdür. İlk yaklaşım derin öğrenme alanında uzman kişiler tarafından uygulanır. Özel bir nesne algılayıcıyı sıfırdan eğitmek için yeni bir ağ mimarisinin tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca bu işlem için birçok zamana ve eğitim verisine ihtiyaç var iken CNN katman ve ağırlıkları manuel (el ile) olarak ayarlanmaktadır. İkinci yaklaşım nesne algılama yöntemlerini kendi özel veri seti ile uygulamaya geçirecek araştırmacılar için uygundur. Önceden eğitilmiş bir ağ kendi uygulamanız için bir takım ince ayar yapmanıza olanak sağlar. Bu yaklaşım daha hızlı sonuç sağlamaktadır. Çünkü binlerce hatta milyonlarca görüntü üzerinden eğitilmişlerdir. Nesne algılama yöntemlerinin yıllara göre ortaya çıkış zaman çizelgesi Şekil 1’de sunulmuştur. 2012 yılı CNN tabanlı nesne algılama da bir dönüm noktasıdır (Zaidi vd., 2022).



Şekil 1. Nesne algılama algoritmalarının ortaya çıkış tarihçesi

Literatürde birçok nesne algılama algoritmaları ve yöntemleri vardır. Bu yöntemler araştırmacılar ve geliştiricilerin araştırmaları ile sürekli olarak güncellenmektedir. Bu durum nesne algılama üzerine çalışma yapacak grupların kendilerini sürekli olarak güncel tutması anlamına gelmektedir. Literatürde iki tür nesne algılama detektör türü vardır. Bunlar bir aşamalı ve iki aşamalı detektörlerdir (Zaidi vd., 2022). Genel olarak bu iki tür detektörlere bağlı nesne algılama yöntemleri kullanılmaktadır. Alexewy ve Chien-Yao’ya göre iki dedektör arasındaki çalışma düzeni farkı Şekil 2’de sunulmuştur (Bochkovskiy vd., 2020).



Şekil 2. Bir ve iki aşamalı dedektörlerin çalışma prensibi farkı

Bir ve iki aşamalı dedektörler prensibine göre nesne algılama yöntemleri Tablo 2’de ortaya çıkış tarihi göre verilmektedir (Lohia vd., 2021).

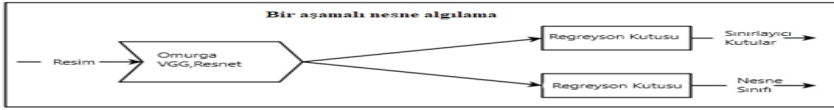
Tablo 2. Bir ve iki aşamalı dedektörlü nesne algılama yöntemleri

Kaynak	Yıl	Modeller	Kullanılan dedektör
(Girshick vd., 2014)	2014	R-CNN: Bölge tabanlı CNN detektör	İki aşamalı dedektör
(Girshick, 2015)	2015	Fast R-CNN: R-CNN’nin daha hızlı versiyonu	İki aşamalı dedektör
(Ren vd., 2007)	2017	Faster R-CNN: Yeni RPN kullanımı	İki aşamalı dedektör
(He vd., 2017)	2017	Mask R-CNN: Faster R-CNN’in eklentisi	İki aşamalı dedektör
(Lin, Tsung-Yi vd., 2016)	2017	FPN: Özellik Piramit Ağı	İki aşamalı dedektör
(Redmon vd., 2016)	2016	YOLO: You Only Look Once	Bir aşamalı dedektör
(Redmon ve Farhadi, 2016)	2017	YOLOv2:YOLO’nun ikinci versiyonu	Bir aşamalı dedektör
(Redmon ve Farhadi, 2018)	2018	YOLOv3:YOLO’nun üçüncü versiyonu	Bir aşamalı dedektör
(W. Liu vd., 2016)	2016	SSD: Tek çekim çoklu kutu algılama	Bir aşamalı dedektör
(Lin vd., 2017)	2017	RetinaNet	Bir aşamalı dedektör
(Zhang vd., 2017)	2018	RefineDet	Bir aşamalı dedektör
(Ghiasi vd., 2019)	2019	NAS-FPN	Bir aşamalı dedektör
(Tan vd., 2019)	2020	EfficientDet	Bir aşamalı dedektör
(Bochkovskiy vd., 2020)	2020	YOLOv4:YOLO’nun dördüncü versiyonu	Bir aşamalı dedektör
(Hoher, 2020)	2021	YOLOv5:YOLO’nun beşinci versiyonu	Bir aşamalı dedektör
(Li vd., 2022)	2022	YOLOv6:YOLO’nun altıncı versiyonu	Bir aşamalı dedektör
(Wang vd., y.y.)	2022	YOLOv7:YOLO’nun yedinci versiyonu	Bir aşamalı dedektör

3.Farklı Nesne Algılama Modelleri

3.1.Bir aşamalı dedektörler (Single-Stage Networks)

Bir aşamalı ağlarda CNN, bağlantı kutularını kullanarak görüntü üzerinden ağ tahminleri üretir ve nihai sınırlayıcı kutular (bounding boxes) oluşturur. Bu yaklaşım iki aşamalı ağlardan daha hızlıdır. Ancak küçük nesnelerin algılanması konusunda aynı doğruluk düzeyine ulaşması mümkün değildir. Şekil 3’de Bir aşamalı dedektör ağ yapısının çalışma prensibi gösterilmektedir (Bochkovskiy vd., 2020).



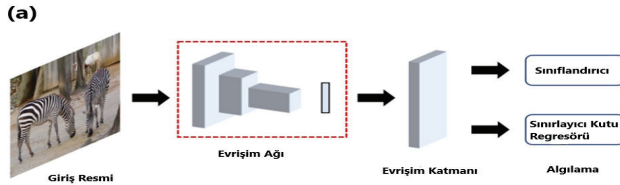
Şekil 3. Bir aşamalı dedektör ağ yapısının çalışma prensibi

3.1.1.You Only Look Once (YOLO)

The You Only Look Once (YOLO) (Redmon vd., 2015) basit bir CNN ağı kullanarak sınıf olasılıklarını ve sınırlayıcı kutuları doğrudan giriş görüntüsünden tahmin eden bir aşamalı bir ağ modelidir (Sultana vd., 2019). YOLO görüntü piksellerini nesneler halinde ve sınırlayıcı kutu özelliklerini direkt olarak tahmin ederek bu durumu bir regresyon problemi olarak yeniden çerçevlendirmiştir. Girdi olarak alınan görüntü ilk aşamada $N \times N$ 'lik ızgaralara ($9 \times 9, 32 \times 32$ vb.) bölünmektedir. Bölünen her bir ızgara kendi içinde nesne olup olmadığını belirler ve eğer var ise nesnenin merkezinin düştüğü hücre onu algılamakla sorumludur. Bir ızgara hücresi birden fazla sınırlayıcı kutu tahmin etmektedir ve her bir tahmin dizisi beş kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; sınırlayıcı kutunun merkezi ($x-y$), kutunun yüksekliği ($w-h$) ve güven puanıdır (Zaidi vd., 2022). Güvenilirlik puanı, tahmin edilen ve yer gerçeği kutuları (the ground truth boxes) arasındaki birleşim kesişimi (Intersection over Union (IoU)) ile nesneyi algılama olasılığının çarpılmasıyla hesaplanır (Sultana vd., 2019).

Birden fazla ızgaranın nesnenin kendi içerisinde olduğunu düşünmesi ekranda gereğinden fazla sınırlayıcı kutuların oluşumuna neden olacaktır. Her kutunun güven skorunun olması ve bu durumun engellenmesi Non-max Suppression algoritması yardımıyla olmaktadır. Görüntü üzerinde çizilen fazla sınırlayıcı kutuların güven skoruna bakarak en yüksek olanı ekrana çizerek problem çözüme kavuşmuş olunur. YOLO modelinin eğitim detaylarına bakılacak olursa, 24 evrişim katmanına ve iki tam bağlantılı katmanına sahiptir. Giriş görüntüsünün çözünürlüğü artırılmakta

ve algılama doğruluğunu artırmak için sınırlayıcı kutu koordinatlarına, kutu yükseklik ve genişliğine toplu (batch) normalizasyon kullanılmıştır. YOLO ağ mimarisinin son katmanında lineer aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Çıktı katmanında toplam kare hatanın kullanılması, modellerinin kolayca optimize edilmesini sağlamıştır. Yazarlar (Redmon vd., 2016) modelin eğitimi-doğrulanması-test süreci için PASCAL VOC 2007 ve 2012 (Everingham vd.) veri setlerinde deneme işlemleri gerçekleştirmişlerdir. YOLO, bir aşamalı gerçek zamanlı modelleri hem doğruluk hem de hız açısından büyük bir farkla geride bıraktı. Ancak YOLO'nun da küçük veya kümelenmiş nesneler için doğruluk ve sınıflandırma gibi dezavantajları vardır. Bu durum YOLO'nun sonraki versiyonlarında düzeltilmiştir. YOLO nesne algılama modelinin mimarisi Şekil 4'de sunulmaktadır (Zaidi vd., 2022).



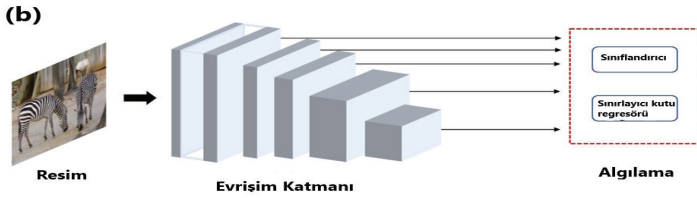
Şekil 4. YOLO ağ mimarisi

YOLO sürekli olarak güncellenen bir aşamalı nesne algılama metodu olarak birçok versiyonlara sahiptir. Kullanıcıların veri setine, kabiliyetlerine ve bilgisayar özelliklerine göre hangi modeli kullanacağına kendisi karar vermelidir. YOLO devamlı olarak gelişen ve geliştirilen son teknoloji nesne algılama modeli olarak birçok alanda kullanılmaya devam edecektir.

3.1.2. Tek çekim çoklu kutu algılama (The single shot multibox detection(SSD))

Tek çekim çoklu kutu algılama (SSD) (W. Liu vd., 2016) modeli, tüm görüntüyü girdi olarak almakta ve farklı boyutlarda filtrelerle sahip birden çok evrişim katmanından geçirmektedir. SSD, Faster R-CNN gibi iki aşamalı detektörlerin doğruluk oranını karşılayan ilk bir aşamalı detektördür. VGG-16 ve ek yardımcı yapılar ile inşa edilen SSD'nin performansı oldukça yüksektir. Eklenen bu yardımcı evrişim katmanlarının boyutu model sonuna doğru giderek küçülmektedir.

Faster R-CNN'nin bağlantı (anchor) kutularına benzer şekilde, SSD'nin de anchor kutularının parametreleri vardır. Bunlar merkez noktasının koordinatları, genişlik ve yükseklik olarak ifade edilmektedir. Sınırlayıcı kutuları tahmin etme anında SSD modeli her bir nesne üzerindeki güvene karşılık gelen bir olasılık vektörü üretmektedir (Sultana vd., 2019). Aşağıda Şekil 5'de yer alan SSD mimarilerine (Sultana vd., 2019; Zaidi vd., 2022) bakıldığında birden çok dönüşüm katmanından sonra sınırlayıcı kutular tahmin edilmektedir. Her evrişim (conv) katmanı farklı bir ölçekte çalıştığı için çeşitli ölçeklerdeki nesneleri algılayabilmektedir. Bu nesne dedektörü, hız ve doğruluk arasında iyi bir denge sağlamaktadır. SSD'nin diğer algoritalardan daha hızlı ve doğru olmasının nedeni bu denge durumudur. Eğitim sırasında, SSD her bir yer gerçeği kutusunu (ground truth box) en iyi jaccard çakışmasına sahip varsayılan kutularla eşleştirmektedir. Ayrıca sert negatif madencilik ve ağır veri artırma işlemi eğitim sürecinde kullanılmıştır (Zaidi vd., 2022). Jaccard indeksi: Bu indeks örnek veri kümesinde yer alan benzerlik ve çeşitliliği ölçmek için kullanılan bir istatistiktir (Glen, 2022).



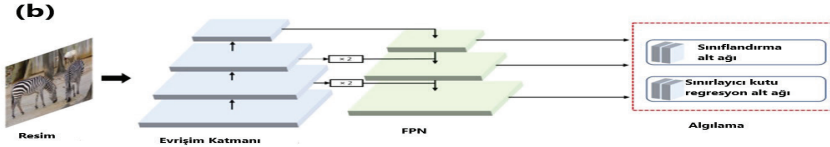
Şekil 5. SSD mimarisi

3.1.3.RetinaNet

RetinaNet (Lin vd., 2017) bir girdi görüntüsündeki nesne konumlarının yoğun örneklemeşi üzerinde çalışan basit, bir aşamalı, birleştirilmiş bir nesne dedektörüdür. bir ve iki aşamalı dedektörlerin doğrulukları arasındaki fark göz önüne alındığında, Lin ve vd.'leri bir aşamalı dedektörlerin gecikmesinin nedeninin “aşırı ön plan-arka plan sınıfı dengesizliği” olduğunu ileri sürmüştür. Dengesizliği düzeltmenin bir yolu olarak odak kaybı (focal loss) adı verilen yeniden şekillendirilmiş bir çapraz entropi kaybı önerisinde bulundular. Odak kaybı parametresi, kolay örneklerden kayıp katkısını azaltmaktadır. Şekil 6'de (Zaidi vd., 2022) gösterildiği gibi, model bir omurga ağı ve göreve özel iki alt ağdan oluşmaktadır. Omurga olarak Özellik Piramidi Ağı (FPN) (Lin, Tsung-Yi, Dollar, Piotr,

Girshick Ross, He, Kaiming, Hariharan, Bharath, 2016) ve iki benzer alt ağ kullanır. Bu alt ağlar sınıflandırma ve sınırlayıcı kutu regresörü olarak isimlendirilmektedir.

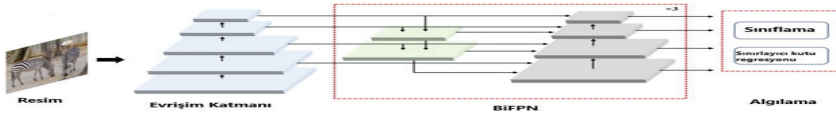
FPN'den gelen her katman, nesneleri çeşitli ölçeklerde algılamasını sağlayarak alt ağlara geçirilmektedir. Sınıflandırma alt ağı, her konum için nesne puanını tahmin ederken, kutu regresyon alt ağı, yer gerçeğe her bir çapa (anchor to the ground truth) için ofseti geri çekmektedir. Her iki alt ağ da küçük FCN'dir ve bağımsız ağlarda parametreleri paylaşmaktadır. Önceki çalışmaların çoğundan farklı olarak, yazarlar, sınıftan bağımsız bir sınırlayıcı kutu regresörü kullanmakta ve bunların eşit derecede etkili olduğunu sonucuna varmaktadır. RetinaNet'in eğitilmesi kolay ve doğruluk-çalışma sürecinde iki aşamalı dedektörlerden daha iyi performans sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 6. RetinaNet mimarisi

3.1.4.EfficientDet

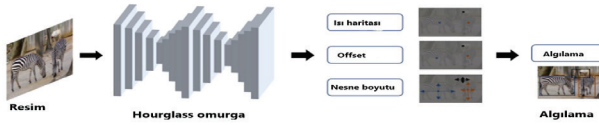
Tan ve ark.'ları (Tan vd., 2019) daha yüksek doğruluk ve verimliğe sahip ölçeklenebilir dedektör fikri ile EfficientDet'i literatüre sunmuşlardır. Bu model de verimli çok ölçekli özellikler, BiFPN ve model ölçekleme aşamaları yer almaktadır. BiFPN çift yönlü piramit ağıdır. Giriş özelliklerinin farklı ölçekler şeklinde çapraz bağlantısı için öğrenilebilir ağırlar sunmaktadır. Mevcut dedektörler büyük, derin omurga veya FPN katmanları ile ölçeklenirken EfficientDet, omurga ağının, BiFPN ağının, sınıf/kutu ağının ve çözünürlüğün tüm boyutlarını ortaklaşa ölçeklendirebilmek için bir bileşik katsayı sunmaktadır. EfficientDet, özellik çıkarma ağı olarak seri olarak istiflenmiş birden fazla BiFPN katmanı setiyle omurga ağı olarak EfficientNet'i (Tan ve Le, 2019) kullanır. BiFPN katmanından gelen çıktılar nihai BiFPN'den sınıf ve kutu tahmin ağına gönderilmektedir. EfficientDet ağ yapısı (Tan vd., 2019; Zaidi vd., 2022) Şekil 7'da sunulmuştur. EfficientDet, önceki dedektörlerden daha iyi verimlilik ve doğruluk elde ederken, hesaplama açısından daha da ucuzdur. Ölçeklendirmesi kolaydır, diğer görevler için iyi genelleme yapar ve bir aşamalı nesne algılama için mevcut en gelişmiş modeldir.



Şekil 7. Efficient nesne algılama model mimarisi

3.1.5.CenterNet

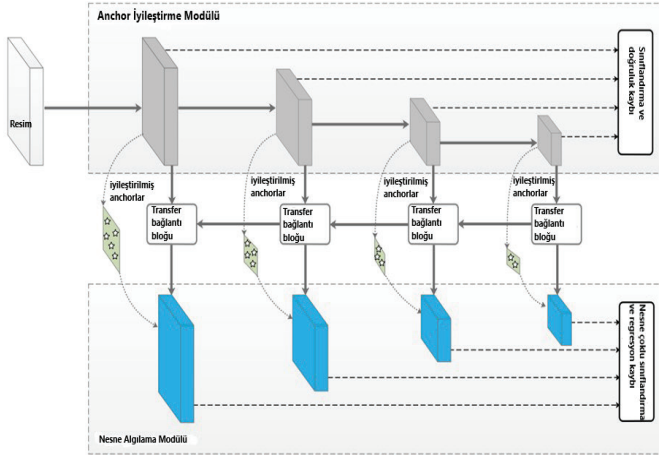
Zhou ve ark.'ları (Zhou vd., 2019), geleneksel sınırlayıcı kutu temsili yerine nesneleri noktalar olarak modellemek için çok farklı bir yaklaşım benimsemektedir. CenterNet, nesneyi sınırlayıcı kutunun merkezinde tek bir nokta olarak tahmin ederek algılamaktadır. Ardından tepe noktaları algılanan nesnelerin ısı haritası oluşturulması için bir FCN'den geçirilmektedir. Özellik çıkarma ağı olarak bir ImageNet önceden eğitilmiş yığınlı Hourglass-101 (Newell vd., 2016) kullanır ve bu ağ üç farklı kafa yapısına sahiptir. Bu kafalar sırasıyla, nesnenin merkezini belirlemek için ısı haritası kafası, nesnenin boyutunu tahmin etmek için boyut kafası ve nesne noktasının ofsetini düzeltmek için ofset kafasıdır. Çıkarım sırasında, nesne noktasını belirlemek için ofset kafasından gelen çıktı kullanılır ve son olarak bir kutu oluşturulur. CenterNet nesne algılama alanına yeni bir bakış açısı getirmekle birlikte daha iyi performans sergilemesi için farklı omurga mimarilerine ihtiyacı vardır (Zaidi vd., 2022). CenterNet çalışma mimarisi Şekil 8'de ifade edilmiştir (Zaidi vd., 2022).



Şekil 8. CenterNet nesne algılama model mimarisi

3.1.6.RefineNet

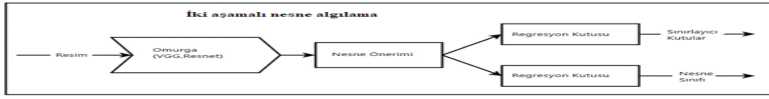
RefineDet (Zhang vd., 2017), Şekil 9’de gösterildiği gibi, ileri beslemeli evrişimli bir ağı dayalı tek atışlık bir nesne detektörüdür. Bu ağ birbirine bağlı iki modülden oluşur: (i) anchor iyileştirme modülü (ARM), (ii) nesne algılama modülü (ODM). ARM modülü, negatif anchorları filtreleyerek sınıflandırıcı için arama alanını azaltır ve anchorların boyutlarını ve konumlarını ayarlar. ODM modülü, girdi olarak ARM modülden gelen ayarlanmış anchorları alarak onların regresyon doğruluğunu geliştirir ve çoklu sınıf etiketlerini tahmin eder. Transfer bağlantılı blok (transfer connected block -TCB), ODM modülündeki nesnenin konumlarını, boyutlarını ve sınıf etiketlerini tahmin etmek için ARM modülündeki özellikleri aktarır. Bu modelin eğitiminde yazarlar temel ağ olarak VGG-16 ve ResNet 101 (He vd., 2016) ağını kullanmışlardır. Bu ağlar, ImageNet sınıflandırması ve algılama veri kümesi üzerinde önceden eğitilmiştir. VGG-16’nın altıncı ve yedinci özellik katmanı (FC) yerine evrişim katmanlarını kullanmışlardır. Ayrıca, üst düzey bilgileri yakalamak ve birden çok ölçekte nesneleri algılamak için, VGG-16 ağının sonuna iki evrişim katmanı ve ResNet-101’in sonuna bir artık blok eklenmiştir.



Şekil 9. RefineNet nesne algılama model mimarisi

3.2.İki aşamalı dedektörler (Two-Stage Networks)

İki aşamalı ağlarda ilk aşamada bölge önerileri veya görüntüde yer alan nesnelerin alt kümeleri tanımlanmaktadır. Bu işleme nesne önerisi oluşturma (object proposal generation) denilmektedir. Bu aşamada dedektörler görüntüde nesne olabilecek potansiyel bölgeleri belirlenmeye çalışılacaktır (Zaidi vd., 2022). İkinci aşamada ise bölge önerileri içinde yer alan nesneler sınıflandırılmaktadır. Bu yaklaşım ile doğruluğu yüksek nesne algılama sonuçları elde edilmektedir. İki aşamalı olduğu için bir aşamalı ağlara göre daha yavaştır. İki aşamalı ağ çalışma mimarisi Şekil 10’de basit olarak sunulmuştur (Daoud vd., 2022).



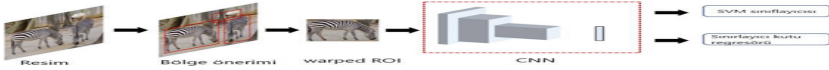
Şekil 10. İki aşamalı dedektör ağ yapısının çalışma prensibi

3.2.1. Bölge Tabanlı Evrişimli Sinir Ağları (Region Based Convolutional Neural Networks (R-CNN))

2014 yılında R.Girshich ve arkadaşları (Girshick vd., 2014) CNN’le-rin algılama performansını iyileştirmek için Bölge Tabanlı Konvolüsyonel Sinir Ağı (R-CNN) adında yeni bir model geliştirmişlerdir. Bu model CNN tabanlı ilk iki aşamalı nesne algılama modeli olarak literatüre kazandırılmıştır (Arabacı, 2022; Girshick vd., 2014; Sultana vd., 2019; Zaidi vd., 2022). R-CNN mimarisi aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere üç farklı blok içermektedir. İlk olarak girdi görüntüsünden 2000 nesne adayları üreten bölge önerisi/tavsiyesi oluşturulmaktadır. Bu adaylar daha sonra “warp” işleminden geçerek 4096 boyutlu özellik vektörü çıkaran bir CNN ağı ile yayılmaktadır (Arabacı, 2022). R.Girshich ve arkadaşları R-CNN dedektörünün omurga mimarisi olarak AlexNet kullanmışlardır (Krizhevsky ve Hinton, 2012). İkinci blok da ise AlexNet mimarisi izlenerek her bir bölge önerisinden sabit boyutlu özellik vektörü çıkarmak için beş evrişim ve 2 tam bağlı (FC) katmanı olan bir CNN kullanılmıştır. Çıkarılan bölgelerin farklı boyutta olması ve CNN ‘e girdi olarak sabit boyutlu görüntü gerektiğinden her bölge önerisinin sabit boyutlu girdi görüntüsüne dönüşümü için afin görüntü çarpıtma (affine image warping) kullanılmıştır (Wolberg, 1992).

Dönüşümü tamamlanan görüntüler her bir bölge önerisinden sabit boyutlu özellik vektörlerini çıkarmak için ayrı bir CNN ağını beslemektedir. Son blokta ise her bir bölge önerisinin oluşturduğu kategorileri doğrusal destek vektör makinesi (SVM) ile sınıflandırır. R-CNN nesne algılama

alanında yeni bir akım başlatmıştır. Ancak oldukça yavaş eğitim sürecine sahiptir. Görüntü başına 47 saniyelik uzun bir sürece sahiptir. Karmaşık eğitim sürecinin yanı sıra küçük veri kümeleri üzerinde bile eğitim yapmak günler almaktadır (Zaidi vd., 2022). Bu durum R-CNN'in gerçek zamanlı uygulamalar için oldukça yavaş ve uygulanamaz olduğunu ifade etmektedir (Arabacı, 2022). R-CNN mimarisi Şekil 11'de sunulmaktadır (Zaidi vd., 2022).

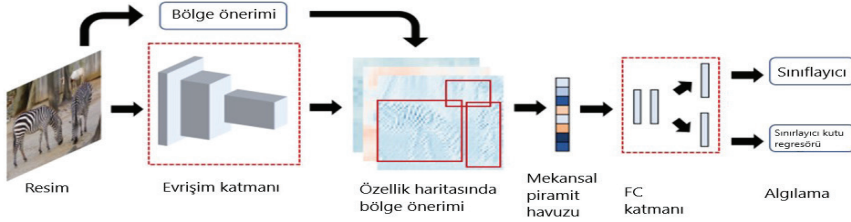


Şekil 11. R-CNN mimarisi

3.2.2.Hızlı Bölge Tabanlı Evrişimli Sinir Ağları (Fast Region Based Convolutional Neural Networks (Fast R-CNN))

R-CNN'de girdi olarak verilen görüntünün 2000 bölge tavsiyesine ayrılması eğitim zamanı artırdığı, veri depolama alanının fazla olması gerektiğinden dolayı maliyetin yüksek olduğu bir model tasarımı anlamına gelmektedir. Ek olarak yavaş nesne algılama durumu da diğer büyük problem olarak ifade edilmektedir. R-CNN'in var olan problemlerini çözmek amacıyla 2015'de R.Girshich ve ark.'ları (Girshick, 2015) modifiye edilmiş yeni bir R-CNN algoritması önerdi. Bu algoritma Fast R-CNN olarak nesne algılama dünyasına kazandırılmıştır. R-CNN'in en büyük problemi olan birden fazla sistemi ayrı ayrı eğitme anlayışı Fast R-CNN'in getirmiş olduğu uçtan uca eğitilebilir sistemi ile değiştirilmiştir. Ağ sadece girdi olarak bir görüntü ve ona verilmiş olan nesne önerilerini dikkate alır. Üretilen CNN özellik haritasından ilgi bölgeleri (Region of Interests (RoI)) seçici arama (selective search) yöntemi kullanılarak tanımlanır. Elde edilen RoI'lerin sabit uzunlukta olabilmesi için bir özellik vektörüne yeniden şekillendirmek için bir RoI havuzlama katmanı yazarlar tarafından uygulanmıştır. Ardından FC katmanı bu öz nitelik vektörlerini girdi olarak bünyesine alır. Son olarak softmax ve bbox regressor gibi sınıflandırıcılar ile bölgedeki nesneye ait sınıf, nesnenin sınırlayıcı kutusu ile belirlenmektedir. Bu algoritmaların eğitim detayları oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bazı kısımları hakkında bilgi vermek gerekirse, yazarlar ImageNet veri setinde önceden eğitilmiş üç tür (CaffeNet, AlexNet ve VGG16 başka bir sürümüyle VGG CNN M 1024) ağ kullanarak modellerini denemişlerdir. Bu önceden eğitilmiş ağın başlatılması sırasında ağ da olan maximum havuzlama katmanı bir RoI havuzlama katmanı ile değiştirilmiştir. Bu durum Fast R-CNN ağ mimarisinin eğitim süresinin ve test aşamasında nesne algılama süresinin kısalmasına yol açmıştır. Ya-

zarlar modifiye R-CNN ile test zamanında 45 kat eğitim zamanında ise 9 kat daha hızlı sonuçlar elde etmeyi başarmışlardır (Arabacı, 2022; Sultana vd., 2019; Uğurluoğlu, 2021). Fast R-CNN çalışma mimarisi Şekil 12’de verilmektedir (Zaidi vd., 2022).

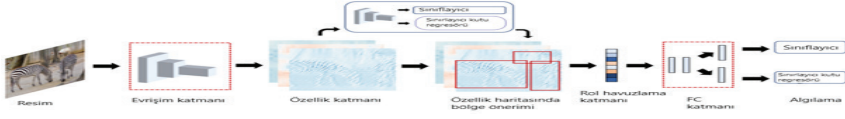


Şekil 12. Fast R-CNN mimarisi

3.2.3. Daha Hızlı Bölge Tabanlı Evrişimli Sinir Ağları (Faster Region Based Convolutional Neural Networks (Faster R-CNN))

R-CNN ve Fast R-CNN nesne algılama süreci bölge önerme algoritmasına bağlıdır (Sultana vd., 2019). İki model de bölge önerilerinin hesaplanması ağırlıklı olarak genel performansını etkileyen zaman alıcı bir faktör olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Ren ve ark.’larının (Ren vd., 2007) bölge öneri ağı (Region Proposal Network (RPN)) olarak tamamen sarmal bir ağ önermesi ile Faster R-CNN ortaya çıkmıştır (Zaidi vd., 2022). Bir RPN, giriş olarak keyfi boyutta bir görüntü alan ve bir dizi dikdörtgen aday nesne önerisi çıkaran tamamen evrişimli bir ağıdır (Fully Convolutional Network-FCN). Nesne teklifleri, tekliflerin bir nesne içerip içermediğini belirlemek için nesnellik puanı ile derecelendirilmektedir. Ayrıca RPN nesnelerin boyut varyansını çözmek için bağlantı kutuları (anchor boxes) sunmaktadır. Ağa sunulan giriş görüntüsünün özellik haritasının çıkarılması için ilk olarak CNN’den geçirilmektedir. Bunlar, sınırlayıcı kutular ve bunların sınıflandırılmasını üreten RPN’e iletilmektedir. Seçilen teklifler CNN katmanında elde edilen özellik haritaları ile eşlenir ve sınırlayıcı kutu regresörüne gönderilen tam bağlantılı katmanı beslemek için kullanılır. Faster R-CNN temel olarak bölge teklif modülü olarak RPN’li Fast R-CNN’dir. Farklı görevleri yerine getirmesi amacıyla iki model arasında paylaşılan katmanların varlığı Faster R-CNN ağ eğitimi daha karmaşık hale getirmektedir. Eğitim sürecinde ilk olarak, RPN, ImageNet veri setinde (Deng vd., 2009) önceden eğitilmiş ve PASCAL VOC veri seti ile ince ayar yapılmıştır. İlk adımdan itibaren RPN’nin bölge önerilerinden bir Faster R-CNN eğitilmiştir. Bu kısma kadar ağ evrişim katmanına sahip değildi. Bu noktadan itibaren dedektör evrişim katmanına sabitlenir

ve RPN'deki benzersiz katmanlara ince ayar (fine-tune) yapılmaktadır. Faster R-CNN önceki son teknoloji nesne algılama algoritmasına göre algılama doğruluğu %3'ten fazla artırmıştır. Faster R-CNN ağ mimarisi Şekil 13'da verilmektedir (Zaidi vd., 2022).



Şekil 13. Faster R-CNN mimarisi

R-CNN, Fast R-CNN ve Faster R-CNN nesne algılama modellerinin karşılaştırmalı durumu Tablo 3'de sunulmaktadır (Verma, 2021). Her bir modelin bölge önerme yöntemi, tahmin zamanlaması, mAP değerleri gibi bilgiler bulunmaktadır. Faster R-CNN diğer CNN modellerine göre hız ve doğruluk olarak daha iyi durumdadır.

Tablo 3. R-CNN, Fast R-CNN ve Faster R-CNN model karşılaştırmaları

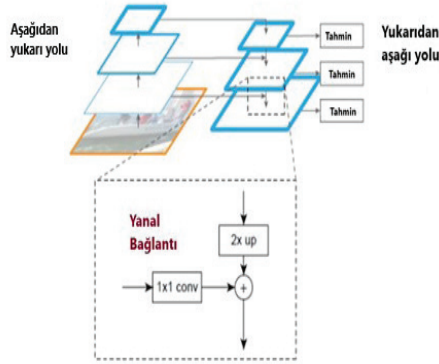
	R-CNN	Fast R-CNN	Faster R-CNN
Bölge Önerim Yöntemi	Seçici araştırma	Seçici araştırma	Bölge önerim ağı
Tahmin süresi	40-50 saniye	2 saniye	0.2 saniye
Hesaplama	Yüksek hesaplama zamanı	Yüksek hesaplama zamanı	Düşük hesaplama zamanı
Pascal VOC 2007 test veri setinde mAP %	58.5	66.9	69.9
Pascal VOC 2012 test veri setinde mAP %	53.3	65.7	67

3.2.4.Özellik Piramit Ağı (Feature Pyramid Network(FPN))

Lin ve ark.'ları (Lin, Tsung-Yi vd., 2016) daha iyi nesne algılama işlemi için CNN'in çok düzeyli özellik haritasını farklı bir şekilde kullanarak özellik piramit ağını (Feature Pyramid Network(FPN)) oluşturmuşlardır. Bu ağ yapısı genel olarak aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Ağ mimarisi aşağıdaki şekilde sunulmaktadır. Aşağıdan yukarıya olan yol klasik bir CNN omurgasıdır. Yukarıdan aşağıya yol ise çok düzeyli bir özellik piramidinden oluşmaktadır. Yukarıdan aşağıya yolda özellik piramidinin her seviyesi aşağıdan yukarıya yolun ilgili yani eşleşen özellik anlam haritalarını girdi olarak kullanmaktadır. Ardından çıktıyı oluşturmak için bu özellik haritalarını

birleştirmektedir. Bu yollar özelliklerindeki anlamsal bilgileri geliştirmek için 1×1 evrişim işlemiyle yanal (lateral) bağlantıyla bağlanmaktadır. FPN bölge önerilerini kullanmak için RPN'i kullanmaktadır. Bölge önerilerinin özellik çıkarımı işlemi FPN ile gerçekleştirilmiştir. Yani FPN'nin omurga ağı olarak ResNet tabanlı Fast R-CNN'i kullanılmıştır. FPN, nesne algılamada hata oranını azaltan tüm ölçeklerde üst düzey fayda sağlayabilir. Ayrıca gelecekteki algılama modellerinde standart bir yapı taşı haline gelmesi bu ağ yapısının literatüre olan katkısını ifade etmektedir. Aynı zamanda PANet (S. Liu vd., 2018), NAS-FPN (Ghiasi vd., 2019) ve güncel teknoloji detektörü olan EfficientNet (Tan ve Le, 2019) gibi diğer gelişmiş ağların geliştirilmesine de yol açmıştır.

Dai ve ark.'ları her öneride yoğun teknikler uygulayan önceki iki aşamalı dedektörlerin aksine, ağ içindeki neredeyse tüm hesaplamaları paylaşan Bölge Tabanlı Tam Evrişimli Ağ (Region-based Fully Convolutional Network (R-FCN)) önermiştir. Şekil 14'da FPN mimarisinin gösterimi mevcuttur (Sultana vd., 2019).

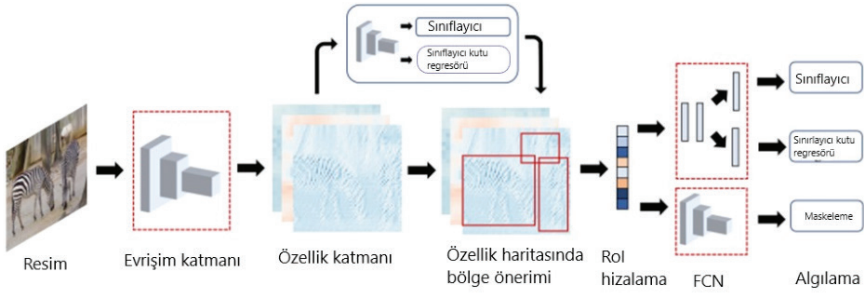


Şekil 14. FPN mimarisi

3.2.5. Maske Bölge Tabanlı Evrişimli Sinir Ağları (Mask Region Based Convolutional Neural Networks (Mask R-CNN))

He ve ark.'ları (He vd., 2017), Faster R-CNN nesne algılama tekniğini bir adım daha ileriye taşımak için yalnızca sınırlayıcı kutular ile çıktı alınan sistemin yerine her nesne örneğinin tam piksellerini bulmaya çalışan Mask R-CNN algoritmasını önermişlerdir. Nesne önerisi için benzer temel kullanan Faster R-CNN mimarisi kullanılmıştır. Bu model bir nesnenin her örneğini bağımsız olarak maskelediği için Mask R-CNN ola-

rak adlandırılmaktadır. Mask R-CNN, bölge teklifleri üretmek için Faster R-CNN'den kesin bölge teklif ağına (RPN) sahiptir. Bu modelde Faster R-CNN'den farklı olmak üzere çıkarılan özellikleri bir nesnenin giriş konumuyla hizalamak için RoI havuzlama katmanı yerine bölge tekliflerine RoIAlign katmanını kullanılmıştır. Faster R-CNN ile Mask R-CNN arasındaki en büyük fark olarak gösterilmektedir. Bu model de yazarlar doğruluk oranını artırmak için ResNeXt-101'i (Xie vd., 2017) ve model hızını artırmak için FPN omurga tasarımını kullanmışlardır. Ayrıca Mask R-CNN'nin genel eğitimi Faster R-CNN'e benzerdir. Mask R-CNN, mevcut son teknoloji ürünü tek modelli mimarilerden daha iyi performans göstermiştir ve küçük ek hesaplamalar ile örnek bölümlenimin (instance segmentation) ekstra bir işlevselliğini eklemiştir. Şekil 15'de Mask R-CNN ağ mimarisinin çalışma prensibi sunulmaktadır (Zaidi vd., 2022).



Şekil 15. Mask R-CNN mimarisi

4.Karşılaştırmalı sonuçlar

İki farklı türdeki (iki aşamalı ve bir aşamalı) nesne algılama modellerini incelediğimiz için, bu modellerin performans karşılaştırması oldukça zor bir süreçtir. Nesne algılama uygulamalarında performans, temel olarak doğruluk ve hız anlamına gelmektedir. Bu çalışmada, bir nesne algılama modelinin performansının; özellik çıkarıcı ağ, giriş görüntüsü çözünürlüğü, eşleştirme stratejisi ve IoU eşiği, teklif veya tahmin sayısı ve kayıp fonksiyonu gibi farklı yönlerle bağlı olduğu ifade edilmeye çalışılmıştır. Tablo 4'de çeşitli nesne dedektörlerinin performansını PASCAL VOC 2012 ve Microsoft COCO veri kümelerinde karşılaştırılması verilmektedir. Tabloda yer alan değerler nesne algılama metotlarının yayınlandığı makalelerden elde edilmiştir. Modeller, çıkarım zamanında ortalama kesinlik (AP), saniye başına işlenen kare sayısı (FPS), aşama sayısı ve gerçek zamanlı algılama yapıp yapamadığı açısından karşılaştırılır. AP0.5, tahmin edilen sınırlayıcı kutunun IoU'su > 0.5 olduğunda, tüm sınıfların ortalama kesinliğidir.

Tablo 4. Farklı nesne algılama modellerinin karşılaştırılması

Model	Yıl	Omurga	AP0.5	FPS	Gerçek Zamanlı Algılama	Aşama Sayısı
R-CNN*	2014	AlexNet	58.50%	~0.02	No	Two
Fast R-CNN*	2015	VGG-16	65.70%	~0.43	No	Two
Faster R-CNN*	2016	VGG-16	67.00%	5	No	Two
FPN	2017	ResNet-101	59.10%	5	No	Two
Mask R-CNN	2018	ResNeXt-101-FPN	62.30%	5	No	Two
YOLO*	2015	(Modifiye edilmiş) GoogleNet	57.90%	45	Yes	One
SSD	2016	VGG-16	41.20%	46	No	One
RetinaNet	2018	ResNet-101-FPN	49.50%	12	No	One
EfficientDet-D2	2020	Efficient-B2	62.30%	41.7	No	One
CenterNet	2019	Hourglass-104	61.10%	7.8-	No	One

Not: * ile işaretlenmiş modeller PASCAL VOC 2012’de, diğerleri ise MS COCO’da karşılaştırılmıştır.

5.Sonuçlar

Son on yılda nesne algılama süreci çok yol kat etmiş olsa da, en iyi performansa ulaşmada hala büyük eksiklikler vardır. Gerçek dünyada ihtiyaçlara çözüm olabilecek uygulamalar arttıkça, mobil ve gömülü sistemlerde konuşlandırılabilen hafif modellere olan zorunluluk katlanarak artmaktadır. Bu çalışmada, çeşitli nesne algılama modellerinin öncekilere göre nasıl geliştiği, çalıştığı ve özellikleri gösterilmiştir. Ayrıca, bu modellerin iki aşamalı ve bir aşamalı olmak üzere iki farklı yaklaşım olarak kategorize edilebileceği de ifade edilmiştir. İki aşamalı dedektörler genellikle daha doğru olmakla birlikte, yavaşlar ve sürücüsüz arabalar veya güvenlik gibi gerçek zamanlı uygulamalar için kullanılamazlar. R-CNN ve Fast R-CNN, harici bölge teklif ağı nedeniyle yavaş algılama durumuna sahiptir. Faster R-CNN, RPN kullanarak bu sorunun üstesinden gelmektedir. Mask R-CNN, önceki modelin mimarisine ilave olarak örnek segmentasyon özelliğini eklemiştir.

Bir aşamalı dedektörlerde ise, YOLO ve SSD bizlere hızlı ve sağlam nesne tespiti için olanak sağlamıştır. RetinaNet, daha iyi algılama işlemi için kayıp işlevini iyileştirmeye odaklanmıştır. RefineDet, hem iki aşamalı hem de bir aşamalı yaklaşımın avantajlarını birleştirerek son teknoloji performans elde eden nesne algılama modelini ortaya çıkarmıştır. Yazarlar bu çalışma ile nesne algılama modellerinin daha iyi anlaşılacağını umut etmektedir.

6.Kaynakça

- Agarwal, S., Terrail, J. O. Du, Jurie, F. 2018. “Recent Advances in Object Detection in the Age of Deep Convolutional Neural Networks”. Tarihinde adresinden erişildi <http://arxiv.org/abs/1809.03193>
- Arabacı, T. 2022. “*FASTER R-CNN DERİN ÖĞRENME YÖNTEMİ İLE DUYGUSAL İFADELERİN TESPİTİ VE GERÇEK ZAMANLI GÖRÜNTÜLERE UYGULANMASI*”. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
- Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., Liao, H.-Y. M. 2020. “YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection”. *Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Borji, A., Cheng, M.-M., Hou, Q., Jiang, H., Li, J. 2019. “*Computational Visual Media Salient object detection: A survey*”. *Computational Visual Media* (C. 5). Tarihinde adresinden erişildi <https://doi.org/10.1007/s41095-019-0149-9>
- Dalal, N., Triggs, B. 2005. “Histograms of oriented gradients for human detection”. *Proceedings - 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2005, I*, 886–893.
- Daoud, E., Khalil, N., Gaedke, M. 2022. “Implementation of a one Stage Object Detection Solution to Detect Counterfeit Products Marked With a Quality Mark IMPLEMENTATION OF A ONE STAGE OBJECT DETECTION SOLUTION TO DETECT COUNTERFEIT PRODUCTS MARKED”, (August).
- Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L., Li, K., Fei-fei, L. 2009. “ImageNet : A Large-Scale Hierarchical Image Database”, 248–255.
- Everingham, M., Gool, L. van, Williams, C., Winn, J., Zisserman, A. y.y. “Pattern Analysis, Statistical Modelling and Computational Learning”. Tarihinde adresinden erişildi <http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/>
- Gauen, K., Dailey, R., Laiman, J., Zi, Y., Asokan, N., Lu, Y. H., ... Chen, S. C. 2017. “Comparison of visual datasets for machine learning”. *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, IRI 2017, 2017-January*, 346–355.
- Ghiasi, G., Lin, T., Le, Q. V. 2019. “NAS-FPN : Learning Scalable Feature Pyramid Architecture for Object Detection”. İçinde *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (ss. 7029–7038). Long Beach, CA, USA: IEEE.
- Girshick, R. 2015. “Fast R-CNN”. *Computer Vision and Pattern Recognition, I*. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1504.08083.pdf>
- Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., Malik, J., Berkeley, U. C. 2014. “Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation”, 580–587.

- Glen, S. y.y. “Jaccard Index / Similarity Coefficient”. Tarihinde 18 Kasım 2022, adresinden erişildi <https://www.statisticshowto.com/jaccard-index/>
- He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., Girshick, R. 2017. “Mask R-CNN”. *Computer Vision and Pattern Recognition*. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1703.06870.pdf>
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. 2016. “Deep Residual Learning for Image Recognition”. İçinde *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, NV, USA: IEEE.
- Hocher, G. 2020. “ultralytics/yolov5”. Tarihinde 12 Aralık 2022, adresinden erişildi <https://github.com/ultralytics/yolov5/releases>
- Huang, J., Rathod, V., Sun, C., Zhu, M., Korattikara, A., Fathi, A., ... Murphy, K. 2017. “Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors”. *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, 2017-January*, 3296–3305.
- Krizhevsky, A., Hinton, G. E. 2012. “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks”. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1–9. Tarihinde adresinden erişildi <https://proceedings.neurips.cc/paper/2012/file/c399862d3b9d6b76c8436e924a68c45b-Paper.pdf>
- Li, C., Li, L., Jiang, H., Weng, K., Geng, Y., Li, L., ... Wei, X. 2022. “YOLOv6: A Single-Stage Object Detection Framework for Industrial Applications”. *Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Lin, Tsung-Yi, Dollar, P., Ross, G., He, K., Hariharan, B. 2016. “Feature Pyramid Networks for Object Detection”. *Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Lin, T., Goyal, P., Girshick, R., He, K., Dollar, P. 2017. “Focal Loss for Dense Object Detection”. *Computer Vision and Pattern Recognition*. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1708.02002.pdf>
- Liu, L., Ouyang, W., Wang, X., Fieguth, P., Chen, J., Liu, X., Pietikäinen, M. 2020. “Deep Learning for Generic Object Detection: A Survey”. *International Journal of Computer Vision*, 128(2), 261–318.
- Liu, S., Qi, L., Qin, H., Shi, J., Jia, J. 2018. “Path Aggregation Network for Instance Segmentation”. *Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y., Berg, A. C. 2016. “SSD: Single Shot MultiBox Detector”. İçinde B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, & M. Welling (Ed.), *Computer Vision -- ECCV 2016* (ss. 21–37). Cham: Springer International Publishing.
- Lohia, A., Kadam, K. D., Bongale, A. 2021. “Bibliometric Analysis of One-stage and Two-stage Object Detection”, (February). Tarihinde adresinden erişildi <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9123&context=libphilprac>

- Newell, A., Yang, K., Deng, J. 2016. "Stacked Hourglass Networks for Human Pose Estimation". Computer Vision and Pattern Recognition. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1603.06937.pdf>
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. 2015. "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection". Computer Vision and Pattern Recognition. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1506.02640.pdf>
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. 2016. "You Only Look Once : Unified , Real-Time Object Detection". İçinde *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, NV, USA: IEEE.
- Redmon, J., Farhadi, A. 2016. "YOLO9000: Better, Faster, Stronger". Computer Vision and Pattern Recognition, 7263–7271.
- Redmon, J., Farhadi, A. 2018. "YOLOv3: An Incremental Improvement". Computer Vision and Pattern Recognition.
- Ren, S., He, K., Girshick, R., Zhang, X., Sun, J. 2007. "Object Detection Networks on Convolutional Feature Maps". Computer Vision and Pattern Recognition, 1–8. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1504.06066.pdf>
- Sultana, F., Sufian, A., Dutta, P. 2019. "A Review of Object Detection Models based on Convolutional Neural Network". Computer Science > Computer Vision and Pattern Recognition. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1905.01614.pdf>
- Tan, M., Le, Q. V. 2019. "EfficientNet : Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks". Machine Learning. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1905.11946.pdf>
- Tan, M., Pang, R., Le, Q. V. 2019. "EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection". Computer Vision and Pattern Recognition.
- Uğurluoğlu, K. 2021. "Nesne Algılama". Tarihinde 08 Kasım 2022, adresinden erişildi <https://kaanugurluoglu123.medium.com/nesne-tanima-algoritmasi-faster-r-cnn-nedir-1738f0cca8b7>
- Verma, Y. 2021. "AIM". Tarihinde 19 Ekim 2022, adresinden erişildi <https://analyticsindiamag.com/r-cnn-vs-fast-r-cnn-vs-faster-r-cnn-a-comparative-guide/>
- Viola, P., Jones, M. 2001. "Rapid object detection using a boosted cascade of simple features". Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1.
- Wang, C., Bochkovskiy, A., Liao, H. M. y.y. "YOLOv7: Trainable bag-of-frebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors". Computer Vision and Pattern Recognition, 1–15.

- Wolberg, G. 1992. "Correcting chromatic aberrations using image warping". Proceedings 1992 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 684–687.
- Wu, X., Sahoo, D., Hoi, S. C. H. 2020. "Recent advances in deep learning for object detection". Neurocomputing, 396(d), 39–64.
- Xie, S., Girshick, R., Dollar, P., Tu, Z., He, K. 2017. "Aggregated Residual Transformations for Deep Neural Networks". Computer Vision and Pattern Recognition. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1611.05431.pdf>
- Zaidi, S. S. A., Ansari, M. S., Aslam, A., Kanwal, N., Asghar, M., Lee, B. 2022. "A survey of modern deep learning based object detection models". Digital Signal Processing: A Review Journal, 126, 1–18.
- Zhang, S., Wen, L., Bian, X., Lei, Z., Li, S. Z. 2017. "Single-Shot Refinement Neural Network for Object Detection". Computer Vision and Pattern Recognition. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1711.06897.pdf>
- Zhao, Z. Q., Zheng, P., Xu, S. T., Wu, X. 2019. "Object Detection with Deep Learning: A Review". IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 30(11), 3212–3232.
- Zhou, X., Wang, D., Philipp, K. 2019. "Objects as Points". Computer Vision and Pattern Recognition. Tarihinde adresinden erişildi <https://arxiv.org/pdf/1904.07850.pdf>
- Zou, Z., Shi, Z., Guo, Y., Ye, J. 2019. "Object Detection in 20 Years: A Survey", 1–39. Tarihinde adresinden erişildi <http://arxiv.org/abs/1905.05055>

“

BÖLÜM 12

MEYVE VE SEBZELERİN DONDURULARAK KURUTULMASI

Ramazan Ülkü ÇETİN¹

”

¹ Department of Food Processing Bandırma Onyedi Eylül University, 10600
Susurluk, Balıkesir, Turkey E-mail: rcetin@bandirma.edu.tr, Orcid No: 0000-
0002-9968-4988

1. Giriş

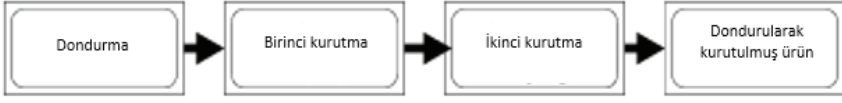
Günümüz tüketicisi daha bilinçli olmasının yanı sıra fiziksel, kimyasal, duyuşsal ve mikrobiyal açıdan mükemmel gıda talep etmekte ve taleplerine yaklaşan gıdaları tüketme eğiliminde davranmaktadır. Dolayısıyla standart ve yüksek kalitede bir son ürünü sürekli olarak piyasaya sunmak işletmeler için günden güne zorunluluk halini almaktadır (Kilci ve Çetin, 2022). Ayrıca yapılan tüketici ve pazarlama araştırmaları, lezzetin de gıda seçiminde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Kilci, 2022a).

Kurutma, gıda endüstrisinde kullanılan yaygın bir kavramdır ve fazla mahsulü rafta dayanıklı bir yapıya dönüştürmek için kullanılır. Bununla birlikte, teknolojinin ilerlemesiyle, gıdaların besinsel ve organoleptik özelliklerini çok yüksek bir seviyede korumak için, en yaygın olarak kullanılan geleneksel konvektif havayla kurutmadan ilerlemeye ilgi vardır. Yalnız bu aşamada dikkat edilmesi gereken husus vitaminler gibi hassas bileşenler gıda işleme sırasında uygulanan ısı işlem gibi prosedürlerden etkilenen hassasiyettedir (Kilci, 2022b). Piyasadaki yüksek kaliteli kurutulmuş ürünlere yönelik mevcut talep, ilk taze ürünün besinsel ve organoleptik özelliklerini korumak için kurutulmuş gıdaların çok yüksek düzeyde muhafaza edilmesini gerektirmektedir ve yeni ürünlerin kurutulması, daha yüksek kapasiteler, daha iyi kalite ve kalite kontrol, azaltılmış çevresel etki, daha yüksek enerji verimliliği ve daha düşük maliyet ve daha güvenli çalışma için yeni teknolojilere ihtiyaç vardır.

Dondurarak kurutma, herhangi bir kurutma yöntemiyle elde edilebilecek en yüksek kaliteli gıda ürününü üretir, ancak yüksek enerji tüketimi ve hem işletme hem de bakım maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle kurutulmuş ürün üretmek için en pahalı işlem olarak kabul edilir. Bu teknoloji, dondurma ve vakumla kurutma ile birlikte disiplinler arası ve karmaşık bir teknoloji olup, ısıya duyarlı ilaçlar ve gıda muhafazası için önemli bir teknoloji haline gelmiştir (Nowak ve Jakubczyk, 2020).

Dondurarak kurutma, suyun katıdan (buzdan) buhara doğrudan geçişi ile suyun süblime olduğu, böylece sıvı halin atlandığı ve ardından suyu “kuru” tabakadan aldığı bir işlemdir (Adams ve ark., 2015). Bu süreçte ürünün kalitesi (biyolojik, besleyici ve organoleptik özellikler) korunur (Assegehegn ve ark., 2019). Bunun nedeni, liyofilizasyondan önce malzemedeki suyun dondurulmasının kimyasal, biyokimyasal ve mikrobiyolojik süreçleri engellemesidir (Chumroenphat ve ark., 2021). Bu nedenle çeşitli besinlerin tadı, kokusu ve içeriği değişmez. Çiğ gıda maddeleri, %80 ile %95 arasında değişen çok miktarda su içerir. Suyun süblimasyon yoluyla uzaklaştırılması, dondurularak kurutulmuş ürünlerin oldukça gözenekli yapısının oluşmasına neden olur ve liyofilizatların rehidrasyonu hemen gerçekleşir (Jia ve ark., 2019).

2. Gıda Ürünlerinin Dondurularak Kurutulması



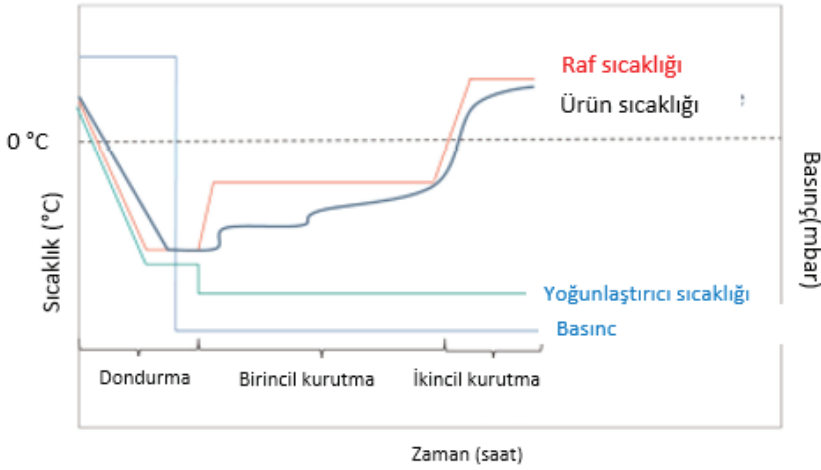
Şekil 1. Dondurarak kurutma süreçleri

Dondurarak kurutma, genellikle düşük basınç altında, çözücünün süblimleştirilmesi ve emilen çözücünün desorpsiyonuyla bir çözücünün donmuş bir malzemeden veya donmuş çözeltiden çıkarıldığı bir işlemdir. Bu işlem aşağıdaki üç aşamayı içerir: Şekil 1’de gösterildiği gibi dondurma, birincil kurutma ve ikincil kurutma dönemleri (Boss ve ark., 2004).

Dondurarak kurutmaya liyofilizasyon da denir. Süblimasyon, dondurarak kurutma işleminin ana prensibidir. Süblimleşme sırasında su, vakumda sıvı halden geçmeden doğrudan buhara dönüştürülür (Eun ve ark., 2020). Liyofilizasyon tekniği birkaç ardışık adımla gerçekleştirilir (Velardi ve Barresi, 2008):

1. Dondurma. Kurutulacak ürün düşük sıcaklıkta dondurulur
2. Birincil kurutma. Bu aşamada buz süblime edilir ve genellikle düşük basınç altında çalışır. Buz süblimleştikçe, süblimleşme yüzeyi – hareketli cephe denilen – gözenekli bir kuru malzeme kabuğu bırakarak geri çekilir. Geri çekme arayüzünden kaynaklanan buhar, kurutulmuş malzeme içinden liyofilizasyon haznesine akar ve hazneye bağlı bir soğutmalı kapalı - buz kondansatörü - onu sürekli olarak uzaklaştırır. Süblimleşme sürecinin itici gücü, süblimleşen buz yüzeyindeki ve yoğunlaştırıcıdaki suyun kısmi basınç farkı ile sağlanır. Şişede dondurarak kurutma ısısı, bir ısıtma rafı aracılığıyla ürüne sürekli olarak sağlanır; bu gereklidir çünkü süblimleşme süreci endotermiktir ve dolayısıyla enerji gerektirir.
3. İkincil kurutma. Dondurarak kurutmanın son aşaması, kısmen kurutulmuş keke adsorpsiyon fenomeni tarafından güçlü şekilde bağlanan artık nemin düşük bir seviyeye indirildiği ve oda sıcaklığında uzun süreli ürün muhafazasını sağlayan bir desorpsiyon aşamasıdır. Bu adım yüksek vakumda ve orta sıcaklıkta (20–60°C) gerçekleştirilir.

2.1. Dondurarak kurutma döngüleri



Şekil 2. Raf, ürün ve kondenser sıcaklıkları ile oda basıncını gösteren dondurarak kurutma döngüsü. Şekilden uyarlanmıştır (Morais ve ark., 2016)

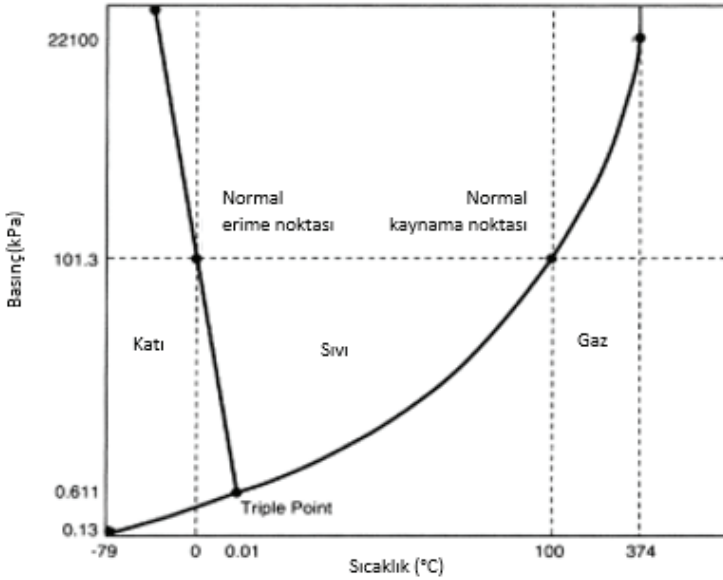
Şekil 2’de, dondurarak kurutma döngüsünden bir kayıt cihazı ile ölçülmüş çıktı izinin bir örneğini vermektedir. İlk adımda sıvı soğutulur ve donarken katılar kalan sıvıda daha konsantre hale gelir. Bu işlem bir dondurarak kurutucuda gerçekleştirildiğinde, raf sıcaklığı düşürülür. Daha sonra, basınç buzun buhar basıncının altındaki değerlere düşürüldüğünde ve buz süblimasyonu ile uzaklaştırılan gizli ısıyı sağlamak için raf sıcaklığı arttığında birincil kurutma başlar. Bu adım, ürün sıcaklığı raf sıcaklığına yaklaştığında sona erer (Pisano, 2022). Sonra, buz kristallerinin süblimleşmesine bağlı olarak açık bir gözenek ağı oluşur ve ikincil kurutma sırasında suyun numuneden desorpsiyonu için bir yol sağlayan, raf sıcaklığı arttırıldığında ve oda basıncını uzaklaştırmak için oda basıncı azaltıldığında oluşur. Uzun olan ve işlem maliyeti üzerinde büyük etkisi olan birincil kurutma aşamasının aksine, ikincil kurutma süresi kısadır ve maliyet üzerinde önemli bir etkisi yoktur (Yoon ve Narsimhan, 2022).

2.1.1. Dondurma

Dondurarak kurutma işleminin ilk adımı, numunelerin katı hale gelmeleri için yeterince düşük bir sıcaklığa maruz bırakıldığı dondurmadır. Bu, sıvı nitrojen kullanılarak, ayrı bir dondurucuda veya dondurarak kurutucunun kendisinde gerçekleştirilebilir. Emülsifiye sistemlerde damlacıkların agregasyonuna neden olabilecek buz kristali oluşumunun neden olduğu fiziksel özelliklerdeki değişiklikler ve tampon tuzların kris-

talleşmesine bağlı pH değişiklikleri bu adımı en önemli aşama haline getirir (Morais ve ark., 2016)

Kristalizasyon süreci, gıda ürünlerinin kalitesini en çok etkileyen unsurdur. Kristalizasyon, genellikle daha yüksek donma noktalarına sahip olan hücrenin dışında başlar. Hücreden hücre içi boşluğa, su difüzyon hızı ve ısı uzaklaştırma hızı kristalleşme hızını belirler (Dincer, 2017) Donma hızı, ürün ile soğutma yüzeyi arasında değiş tokuş edilen ısı akışına, yani ürün ile yüzey arasındaki sıcaklık farkına ve ısı transferine karşı dirençlere bağlıdır. Donma hızı, kristal büyüme hızından daha yavaş olduğunda, birkaç buz çekirdeğinin oluşumuna yol açar, bu da nispeten büyük boyutta az sayıda kristalle sonuçlanır. Öte yandan, donma hızı, hızlı olduğunda daha fazla sayıda küçük kristal oluşma eğilimi gösterir (Harguindeguy ve Fissore, 2020).



Şekil 3. Su için faz diyagramı (ölçeksiz) (Ishwarya ve ark., 2015)

Dondurarak kurutmada, ısıya dayanıksız bileşenlerin korunması sorununu doğrudan ele alır. Dondurarak kurutma işleminde, malzeme önce düşük bir sıcaklıkta dondurularak buz kristalleri oluşturulur. Bu kristaller, birincil kurutma olarak bilinen bir işlemde, bir vakum odasında katı halden doğrudan buhar fazına süblime edilir. Süblimleşme için ön koşul, hem buhar basıncının hem de sıcaklığın, suyun üçlü noktasının (0,6 kPa ve 0,01 °C, Şekil 3) altında tutulmasıdır (Ishwarya ve ark., 2015). Çözünen matriste kalan emilmiş su, daha sonra desorpsiyon (ikincil kurutma) ile daha da azaltılır (Assegehegn ve ark., 2021).

2.1.2. Birincil kurutma

Birincil kurutma aşaması, buz kristallerinin süblimleşme yoluyla çözünen fazdan ayrıldığı dönemdir. Bu noktada, dondurarak kurutucu kabindeki basınç, buz yüzeyindeki buhar basıncının altında tutularak su buharı sürekli olarak gıdadan uzaklaştırılır ve ardından buharın bir vakum pompası ile uzaklaştırılması ve soğutma bobinlerinde yoğunlaştırılması sağlanır (Koganti ve ark., 2011). Bu, kısmen kurutulmuş bir gıda numunesi oluşturur. Ancak süblimleşme hızı, numune kalınlığından ve malzeme hücresel yapısından etkilenebilir ve kütle transfer katsayısında bir kısıtlama oluşturarak dehidrasyon oranını düşürür. Bunun nedeni, gıda maddelerinin dondurulma sürecinin ya doğal konveksiyon koşullarında ya da (özellikle üst yüzeydeki malzemeler için) zorlanmış bir konveksiyon ortamında meydana gelmesi ve malzemenin hava boşluğu ile ayrılmış hücresel yapılardan oluşmasıdır. ısı ve kütle transferinin gerçekleştiği ortamı etkiler (Nowak ve ark., 2016). Süblimleşme için numunenin yüzeyine su buharı taşınmasını etkilemek için mekanik olarak hasar görmüş bir numuneden kaynaklanan hücre duvarlarının bozulmasını bildirdiler. Böylece, numune malzemesinde meydana gelen termal değişiklikler, üst katmanlar ve alt katmanlar için kaydedilen farklı bir sıcaklık ile donma sırasındaki termal alanın eşitsiz olmasına neden olmuştur. Sonuç olarak dondurarak kurutma sırasında malzemenin ısı transfer kapasitesini etkilemiştir. Bu noktada numune sıcaklığı, kurutma işlemine devam etmek için kritik bir parametre haline gelir. Süblimleşmeyi sürdürmek için, süblimleşme soğutmasını telafi etmek için ürüne ısı enerjisi uygulanır (Leys ve ark., 2020).

Ürünler dondurulduktan sonra, bir sonraki adım olan birincil kurutmaya geçer. Bu adım, düşük basınç ve sıcaklıklar tarafından yönlendirilen buz süblimleşmesine izin verir. Buzun süblimleşmesi numunenin üst yüzeyinden başlar ve dibe kadar devam eder (Rockinger ve ark., 2021). Bu şekilde, süblime buhar, gözenekli katmanlardan difüzyon veya konveksiyon yoluyla çıkarılır. Yayılma gözenek boyutu ile ilgili olduğundan, hızlı donmuş ve kuru tabakadan buharın kütle transferini engelleyen küçük buz kristalleri oluşturan numuneler için birincil kurutma adımı uzun olacaktır. Ayrıca, yavaş dondurma, su buharının hareketini kolaylaştıran (kütle aktarım hızı yüksektir) büyük buz kristalleri oluşturur ve bunun sonucunda birincil kuruma süresi kısalmır. Ayrıca, su buharının taşınması için itici güç olduğundan basınç bu aşamada önemli bir rol oynar. Bu nedenle, daha düşük oda basıncı, daha hızlı buz süblimleşmesine yol açar. Bu adım sırasında kontrol edilmesi gereken diğer bir faktör, camsı katı matris durumundan kauçuksu amorf bir duruma geçişi gösteren çökme sıcaklığıdır. Birincil kurutma sırasında çökme meydana geldiğinde ürünün yapısı

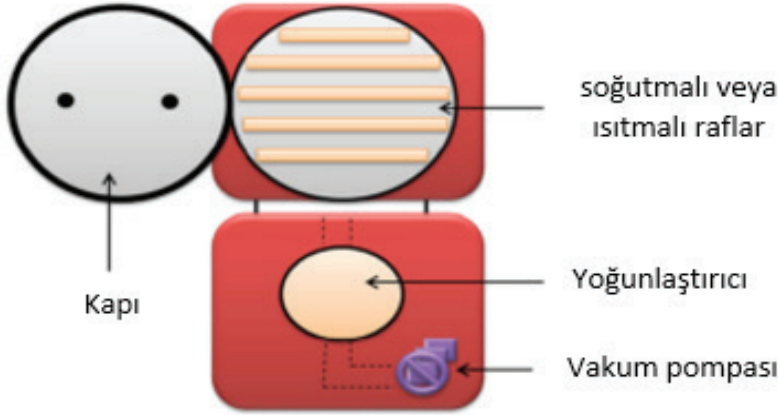
kaybolur veya hasar görür, bu da ürünün kalitesini etkileyebilir (Mortier ve ark., 2016).

2.1.3. İkincil kurutma

İkincil kurutma seviyesi, yüksek buhar akış hızları ile ilişkili dinamik bir işlemdir, bu kurutma seviyesi, toplam işlem süresinin %30-40'ını temsil eden ancak toplamda sadece %5-10'unu temsil eden bir kullanım süresi içerdiğinden çok daha az verimlidir. numune nemi kurutulur. Bu aşama, donmuş suyun tamamı süblime olduktan sonra başlar ve bu nedenle ürün sıcaklığı artırılarak kolaylaştırılabilir. Bununla birlikte, protein gibi gıdaların belirli hassas özelliklerine dikkat edilmelidir. Proteinlerin termal stabilitesi düşüktür ve stabilitesinden daha yüksek bir sıcaklıkta çökebilir, bu nedenle çökmeyi önlemek için gıda ürünlerinin termal stabilitesini bileşenlerine göre değerlendirmek gerekir. Çöküş, “bağlı su” (protein moleküllerine) veya bu aşamada uzaklaştırılan cam fazda “sıkışmış” su molekülleri nedeniyledir. İkincil kurutma sırasında numune çökmesi genellikle birincil kurutma sırasındaki çökmeden daha az olasıdır (Oyinloye ve Yoon, 2020). İkincil kurutma aşaması sırasında en önemli faktör, nem ve gözenekli ortamın adsorpsiyon-desorpsiyon dengesidir. Bu nedenle, kabul edilebilir bir ürün kalitesi elde etmek için hem sıcaklık hem de nem içeriği kontrol edilmelidir (Assegehegn ve ark., 2020).

Yüzey alanı ikincil kuruma hızını etkiler. Hızlı dondurma işlemine tabi tutulan numuneler, geniş bir yüzey alanına sahip çok sayıda küçük kristal üretir, bu da ikincil kurutma sırasında su desorpsiyonunu destekler ve aynı zamanda çift katmanlı yapının bozulmasını azaltır. Bununla birlikte, yavaş bir donma hızı ile kuru tozun yüzey alanı küçüktür, bu da su desorpsiyonunu bozar ve ikincil kurutma sırasında yavaş bir kuruma hızına neden olur (Rochelle ve ark., 2019). Kurutulan ürünün rehidrasyonu susuz olduğu için yavaş yapılmalıdır. Suyun hızlı eklenmesi, gözenekli yapıyı bozabilir ve ürün kalitesini tehlikeye atabilecek sistem matrisinin çökmesine neden olabilir (Sahni ve Pikal, 2017).

3. Dondurarak Kurutma Prensibi



Şekil 4. Dondurarak kurutucunun şematik diyagramı

Dondurarak kurutma yani liyofilizasyon işlemi Şekil 4’de gösterilmektedir. Süblimasyon, dondurarak kurutma işleminin ana prensibidir. Süblimleşme sırasında su, vakumda sıvı halden geçmeden doğrudan buhara dönüştürülür (Eun ve ark., 2020)

Dondurarak kurutma prensibi suyun üç durumlu değişimine dayanmaktadır. Termodinamik faz dengesi teorisine göre suyun üçlü nokta sıcaklığı 0,0098 °C ve basıncı 4,579 mmHg’dir. Suyun faz geçiş sürecinde, basınç, termodinamik dengede katı, sıvı ve buharın bir arada bulunduğu üçlü noktanın altında olduğunda, katı buz, sıvı suya dönüştürülmeden doğrudan gaz halinde su buharına süblimleşebilir (Fereshteh, 2015).

Dondurarak kurutma teknolojisinin etki faktörleri; dondurarak kurutma işlemi sırasında ön işlem, yükleme kapasitesi, dondurma, vakum derecesi ve ısıtma sıcaklığı gibi faktörler ürünün görünümünü, besin bileşimini, nem içeriğini ve diğer niteliklerini etkileyecektir. Dondurarak kurutmanın ısı ve kütle transferi, gıdanın dış yüzeyinden iç kısma doğrudur. Hammaddeler ne kadar fazla ve kalın olursa, kuruma hızı o kadar yavaş ve kuruma süresi o kadar uzun olacaktır. Bu nedenle, yükleme miktarı ve kalınlığı ne kadar küçük olursa, birim zaman başına enerji tüketimi ve kuruma süresi o kadar az olacaktır (Khampakool ve ark., 2019).

Hem katı ürünler (meyve ve sebzeler) hem de sıvı ürünler (meyve suları vb.) dondurarak kurutmadan önce dondurulmalıdır. Dondurma, gıda ürünleri söz konusu olduğunda su olan bir çözücünün kristalleşmesidir. Dondurarak kurutmadan önce malzemedeki suyun buza dönüştürülmesinden kaynaklanan ek faydalar şunlardır (Nowak ve Jakubczyk, 2020):

- Çözelti içindeki bileşenlerin hareketsiz hale getirilmesi ve dondurarak-kurutucu bölmesinde basınç düşüşü sırasında meydana gelen köpüğün önlenmesi.

- Meydana gelen kimyasal, biyokimyasal ve mikrobiyolojik değişiklikleri sınırlamak.

- Dondurulmuş üründe, bir sonraki adımda, kurutulmuş malzemeden su buharının geçişini kolaylaştıran veya sınırlayan özel bir buz kristali yapısı oluşturmak; donma sırasında oluşan buzun yapısı kütle hareketinin yoğunluğunu belirler ve sonuç olarak kurutulmuş malzemenin son morfolojisini şekillendirir.

- Malzemenin sıvı su ile plastikleşmesine bağlı olarak, yapının sertleşmesi, bitki veya hayvan dokusu hücrelerinin, onlardan suyun uzaklaştırılmasından kaynaklanan büzülmesini önleme.

Kriyoskopik sıcaklık aşıldığında, su kristalleşmeye başlar ve çözelti veya hücre suyu kriyo-konsantre olur, bu da kuru madde bileşenlerinin taşınmasına yol açar. Bu nedenle, donmuş doku içinde konsantrasyon gradyanlarını önlemek için dondurma yapılmalıdır. Bu nedenle, malzemenin tüm hacminde aynı anda meydana gelmesine neden olan ve donma sürecini hızlandıran bir aşırı soğutma (malzeme sıcaklığının kriyoskopik sıcaklığın altına düşürülmesi) elde edilmesi avantajlıdır (Kasper ve Friess, 2011).

Dondurarak kurutma için donma hızı çok önemlidir; buz çekirdeklenmesi ve kristal büyümesinin kinetiği, donmuş kekin fiziksel durumunu ve morfolojisini ve bunun sonucunda dondurularak kurutulmuş ürünün özelliklerini belirler. Buz morfolojisi, hem birincil hem de ikincil kurutmada süblimleşme hızı ile doğrudan ilişkilidir (Nowak ve Jakubczyk, 2020).

4. Dondurularak Kurutulmanın Meyve ve Sebzelere Uygulama Alanları

4.1. Meyveler

Gıda sanayi son dönemlerde daha ucuz ve sağlıklı ürünler geliştirilmesine odaklanmıştır. Antioksidan pigmentleri ve çoklu doymamış yağ asitleri gibi fonksiyonel özellikler üzerinde yüksek etki sergileyen doğal bileşenlerin gıdalarda kullanımıyla kronik hastalıkların görülme sıklığının azaldığını gösteren çalışmalar dikkat çekmektedir (Nale, 2021a).

Vitaminler ve amino asitler açısından zengin olan meyveler bu bağlamda öne çıkan besin grupları arasındadır. Ancak taze meyvelerin saklama süresi kısadır ve taşınması elverişsizdir. Yüksek nem seviyeleri içeren taze meyvelerin, fiziksel özelliklerine önemli ölçüde zarar vermeleri,

özellikle çökme ve kabuğun yırtılması nedeniyle klasik kurutma teknikleri ile kurutulması zordur. Farklı dondurarak kurutma raf sıcaklıkları altında dilimlenmiş ve bütün çileklerin çeşitli kalite parametrelerini (kurutma kinetiği, renk ve hacim değişimi) incelendiği çalışmada; büzülme seviyesinin, bütün ve dilimlenmiş çileklerin sırasıyla ortalama %8 ve %2 hacim azalmasına sahip olduğu dondurarak kurutma raf sıcaklığından bağımsız olduğu tespit edilmiştir (Shishegarha ve ark., 2002). Ayrıca, sıcak havayla kurutma ile dondurarak kurutma karşılaştırıldığı bir çalışmada ise, dondurarak kurutma yapılan çileklerde esmerleşme reaksiyonu olmadığı ve kurutulmuş çileğin renk parametreleri daha iyi olduğu tespit edilmiştir, bu da çileklerin kırmızı yüzeyini ve sarı iç kısmının daha iyi koruyabildiğini göstermiştir (Prosapio ve ark., 2017).

Kurutma süresi, kurutma odasının vakum derecesi ve ısıtma sıcaklığının dondurularak kurutulmuş ahududu kalitesi üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada, ürünlerin iyi renk, koku ve tada sahip ürünler elde edilebilirliği tespit edilmiştir (Shan, 2013). Farklı ön işlem yöntemlerinin dondurularak kurutulmuş ürünler üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır. Ahududuyu şekerle ön işleme tabi tutulan bir çalışmada, ön işlem görmüş ahududuların şeker içeriği, ön işlem görmemiş ahududulardan önemli ölçüde daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Sette ve ark., 2017).

Farklı sıcaklıklarda dondurularak kurutulmuş yaban mersini ile yapılan çalışmada, askorbik asit seviyelerini önemli ölçüde azalttığını ve taze yaban mersini ile karşılaştırıldığında antioksidan aktivitede önemli bir azalma göstermediği tespit edilmiştir (Reyes ve ark. 2011). Dondurma hızı, yaban mersininin görünümü ve aroması üzerinde etkili olmuştur. Dondurma hızı ne kadar yavaşsa, renk o kadar koyu, dondurularak kurutulmuş ürünün hacmi o kadar küçük ve aromatik bileşenlerin uçuculuğu o kadar yüksek olmuştur (Ngo ve ark. 2017).

Farklı şekil ve boyutlarda elmalar için numune ne kadar küçükse kuruma süresinin o kadar kısa olduğunu, dikdörtgen şeklinde kesilmiş elmaların ise en kısa kuruma süresine sahip olduğunu bildirilmiştir (Defraeye, 2017). Ayrıca dondurarak kurutmadan sonra, elmanın mikro yapısının ve başlangıç bileşiminin değiştiğini ve dondurarak kurutmanın toplam polifenol içeriğini ve antioksidan aktiviteyi azalttığını tespit edilmiştir (Dalmau ve ark. 2017).

Dondurularak kurutulmuş muzların sıcak havayla kurutmaya göre daha büyük dirençli nişastaya ve daha küçük çapa sahip olduğunu bulmuşlardır (Ubeyitogulları ve Ciftci, 2020). Muzların farklı dondurarak kurutma döngülerinde biraz farklı dokuları vardır. Bu farklı dondurarak kurutma döngüleri sayesinde, daha uzun döngü süresine sahip muzların,

daha kısa döngü süresine sahip muzlara göre doku yapısı üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Andino ve ark., 2019).

Sıcak hava, dondurarak kurutma, kızılötesi ve vakum kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulmuş mango ile yapılan çalışmada, dondurarak kurutmanın diğer kurutma yöntemleriyle karşılaştırıldığında, fenolik içerik ve askorbik asit kaybını azaltıldığı belirlenmiştir (Sogi ve ark., 2015).

4.2. Sebzeler

İnsan beslenmesinde kullanılabilecek çok zengin bir bitkisel kaynak çeşitliliği bulunmakta ve bu kapsamda sebzeler insan beslenmesi için iyi bir temel besin kaynağı olarak öne çıkmaktadır (Nale, 2021b).

Sebzelerin dehidrasyonu genellikle uzun raf ömrü için yapılır. Farklı kurutma yöntemlerini kullanarak dilimlenmiş kuşkonmazın kurutulması ile yapılan bir çalışmada, en yüksek askorbik asit miktarının dondurularak kurutma yöntemi uygulamalarında olduğu tespit edilmiştir (Nindo ve ark., 2003). Başka çalışmada, dondurarak, kızılötesi, vakum ve sıcak havayla kurutma yöntemleriyle kuşkonmazın yapısal özellikleri, biyoaktif maddeleri ve anti-tirosinaz aktivitesi üzerindeki etkilerini incelendiğinde, dondurarak kurutmanın en iyi yöntem olduğunu görülmüş, klorofil ve toplam saponin içeriğinin yüksek seviyede tutulduğunu bildirmiştir (Yu ve ark., 2019).

Dondurularak kurutulmuş havuçlarda yüksek rehidrasyon oranı ve aroma tutulması bildirmiştir (Rajkumar ve ark., 2017). Ayrıca dondurarak kurutmanın havuçların aromasını, rengini ve görünümünü koruduğunu göstermiştir (Rozylo, 2020). Bir çalışmada, dondurularak kurutulmuş havuçlarda toplam karotenin çok az azaldığı ve karakteristik renginin korunduğunu tespit etmişlerdir (Cui ve ark., 2008).

Güneş, fırın, vakum-fırın ve dondurarak kurutma yöntemleriyle domateslerin fenolik miktarı, antioksidan kapasitesi ve askorbik asit içeriği üzerine etkileri üzerine incelenen bir çalışmada, dondurularak kurutulmuş domatesler, diğer kurutma yöntemlerine göre daha yüksek fenolik, antioksidan ve askorbik asit miktarı içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir (Gümüşay ve ark., 2015). Dondurularak kurutulmuş domatesle yapılan başka bir çalışmada, oksidasyona ve sıcaklığa daha az duyarlı olduğunu tespit edilmiş olup, depolama boyunca C vitamini içeriğinde değişiklik görülmemiştir (Serino, 2019).

Fenolik maddeler, flavanoidler, antioksidan kapasiteye sahip bileşenler gibi biyoaktif maddeler, fizyolojik aktiviteleri etkileyerek sağlık üzerine olumlu etkiler sağlayan ikincil metabolitlerdir. Biyoaktif bileşenler, birincil metabolitler olarak bilinen karbonhidrat, protein ve yağ gibi can-

lının büyüme ve gelişmesi için olmazsa olmaz ana besin kaynakları değildirler. Ancak canlının zorlu yaşam koşullarına dayanma gücünü artıran bileşenlerdir. Biyoaktif bileşenler gıdalarda genellikle az miktarlarda bulunsalar da sağlık üzerinde ciddi etkilere sahiptirler (Nale, 2021c). Farklı kurutma yöntemleri ile kurutulan patlıcanlarla ilgili bir çalışmada, yapılan toplam fenolikler, karoten, antioksidan kapasite ve likopen üzerine etkilerini araştırmış olup; dondurarak kurutma ile güneşte, vakumlu ve fırında kurutma yöntemleri karşılaştırıldığında, muhtemelen enzim, bakteriyel ve kimyasal değişiklikleri büyük ölçüde önleyen hafif dondurarak kurutma işlemi nedeniyle toplam fenollerin en yüksek tutma oranına sahiptir (Mbondo ve ark., 2018).

Güneşte, sıcakta ve dondurularak kurutulmuş taze pancar dilimleri ile yapılan bir çalışmada, taze ve kuru kesitlerin kimyasal bileşimi, nitrat ve betain değerleri belirmiş olup, dondurularak kurutulmuş ürünlerdeki kimyasal bileşimin ve mineral içeriğinin, geleneksel kurutulmuş ürünlerden daha yüksek olduğunu ve biyoaktif bileşiklerin ile antioksidanların aktivitesinin de taze kısımdan daha yüksek olduğunu görülmüştür (Hamid ve Nour, 2018). Başka bir çalışmada, dondurularak kurutulmuş pancarların daha kısa kuruma süresine, daha yüksek toplam fenol içeriğine ve yüksek antioksidan aktiviteye sahip olduğunu bildirmiştir (Vallespir ve ark., 2018).

Yapılan bir çalışmada, dondurularak kurutulmuş brokolinin, taze sebzelere kıyasla daha yüksek polifenol içeriği, semse-sistein içeriği ve radyasyon direnci sağlayabildiğini tespit etmiştir (Mahn ve ark., 2012). Başka bir çalışma da ise, dondurularak kurutulmuş bamyanın iyi bir görünümüne, yüksek renk tutma oranına, düşük polisakkarit kayıp oranına ve düşük antioksidan kayıp oranına sahip olduğunu buldu (Li ve ark., 2019).

5. Sonuçlar

Dondurarak kurutma, meyve ve sebzeleri kurutmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzun işlem süresi ve pahalı bir kurutma yöntemi olmasına rağmen yüksek nihai kalite için tercih edilmektedir. Dondurarak kurutma yapılmış meyve ve sebzelerin besinsel değerlerinde bazı kayıplar meydana gelmesine rağmen, diğer kurutma yöntemlerine kıyasla besin özelliklerini korumak için en iyi yöntem olduğu görülmüştür.

6. Kaynaklar

- Adams, G. D., Cook, I., & Ward, K. R. (2015). The principles of freeze-drying. In *Cryopreservation and freeze-drying protocols* (pp. 121-143). Springer, New York, NY.
- Andino, A. R., Pieniazek, F., & Messina, V. (2019). Texture of bananas submitted to different freeze drying cycle applying scanning electron microscopy with image analysis techniques. *Food Biophysics*, 14(1), 13-21.
- Assegehegn, G., Brito-de la Fuente, E., Franco, J. M., & Gallegos, C. (2021). Understanding and optimization of the secondary drying step of a freeze-drying process: a case study. *Drying Technology*, 39(8), 1003-1017.
- Assegehegn, G., Brito-de la Fuente, E., Franco, J. M., & Gallegos, C. (2020). An experimental-based approach to construct the process design space of a freeze-drying process: an effective tool to design an optimum and robust freeze-drying process for pharmaceuticals. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 109(1), 785-796.
- Assegehegn, G., Brito-de la Fuente, E., Franco, J. M., & Gallegos, C. (2019). The importance of understanding the freezing step and its impact on freeze-drying process performance. *Journal of pharmaceutical sciences*, 108(4), 1378-1395.
- Boss, E. A., Maciel Filho, R., & de Toledo, E. C. V. (2004). Freeze drying process: real time model and optimization. *Chemical engineering and processing: process intensification*, 43(12), 1475-1485.
- Chumroenphat, T., Somboonwatthanakul, I., Saensouk, S., & Siriamornpun, S. (2021). Changes in curcuminoids and chemical components of turmeric (*Curcuma longa* L.) under freeze-drying and low-temperature drying methods. *Food Chemistry*, 339, 128121.
- Cui, Z. W., Li, C. Y., Song, C. F., & Song, Y. (2008). Combined microwave-vacuum and freeze drying of carrot and apple chips. *Drying Technology*, 26(12), 1517-1523.
- Dalmau, M. E., Bornhorst, G. M., Eim, V., Rosselló, C., & Simal, S. (2017). Effects of freezing, freeze drying and convective drying on in vitro gastric digestion of apples. *Food Chemistry*, 215, 7-16.
- Defraeye, T. (2017). Impact of size and shape of fresh-cut fruit on the drying time and fruit quality. *Journal of Food Engineering*, 210, 35-41.
- Dincer, I. (2017). *Refrigeration systems and applications*. John Wiley & Sons.
- Eun, J. B., Maruf, A., Das, P. R., & Nam, S. H. (2020). A review of encapsulation of carotenoids using spray drying and freeze drying. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(21), 3547-3572.
- Fereshteh, Z. (2018). Freeze-drying technologies for 3D scaffold engineering. In *Functional 3D tissue engineering scaffolds* (pp. 151-174). Woodhead Publishing.

- Gümüşay, Ö. A., Borazan, A. A., Ercal, N., & Demirkol, O. (2015). Drying effects on the antioxidant properties of tomatoes and ginger. *Food chemistry*, 173, 156-162.
- Hamid, M. G., & Nour, A. A. A. M. (2018). Effect of different drying methods on quality attributes of beetroot (*Beta vulgaris*) slices. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*.
- Harguindeguy, M., & Fissore, D. (2020). On the effects of freeze-drying processes on the nutritional properties of foodstuff: A review. *Drying Technology*, 38(7), 846-868.
- Ishwarya, S. P., Anandharamakrishnan, C., & Stapley, A. G. (2015). Spray-freeze-drying: A novel process for the drying of foods and bioproducts. *Trends in Food Science & Technology*, 41(2), 161-181.
- Jia, Y., Khalifa, I., Hu, L., Zhu, W., Li, J., Li, K., & Li, C. (2019). Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 67-76.
- Kasper, J. C., & Friess, W. (2011). The freezing step in lyophilization: Physico-chemical fundamentals, freezing methods and consequences on process performance and quality attributes of biopharmaceuticals. *European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics*, 78(2), 248-263.
- Khampakool, A., Soisungwan, S., & Park, S. H. (2019). Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture. *Lwt*, 99, 355-363.
- Kilci, Z. (2022a). Fermentasyon uygulamasının bitkisel bazlı süt alternatifleri üretiminde lezzet algısı ve besin bileşimi üzerine olumlu etkileri. (Editör: Doç. Dr. Özlem SALLI BİDECİ). *Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar* (441-460 s.s.). İzmir: Duvar Yayınları.
- Kilci, Z. (2022b). Özel diyet gereksinimleri için yenilikçi gıdalar: Bitki bazlı süt ikameleri. (Editör: Doç. Dr. Özlem SALLI BİDECİ). *Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar* (283-305 s.s.). İzmir: Duvar Yayınları.
- Kilci, Z., & Çetin, R. Ü. (2022). Determination of Some Physicochemical Properties of Milk Procured from Dairy Farms and Different Milk Collectors in Susurluk Region. *The European Journal of Research and Development*, 2(2), 539-552.
- Koganti, V. R., Shalaev, E. Y., Berry, M. R., Osterberg, T., Youssef, M., Hiebert, D. N., ... & Zhang, L. (2011). Investigation of design space for freeze-drying: use of modeling for primary drying segment of a freeze-drying cycle. *Aaps Pharmscitech*, 12(3), 854-861.
- Leys, L., Vanbillemont, B., Van Bockstal, P. J., Lammens, J., Nuytten, G., Corver, J., ... & De Beer, T. (2020). A primary drying model-based comparison of conventional batch freeze-drying to continuous spin-freeze-drying for unit

- doses. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 157, 97-107.
- Li, H., Xie, L., Ma, Y., Zhang, M., Zhao, Y., & Zhao, X. (2019). Effects of drying methods on drying characteristics, physicochemical properties and anti-oxidant capacity of okra. *Lwt*, 101, 630-638.
- Mbondi, N. N., Owino, W. O., Ambuko, J., & Sila, D. N. (2018). Effect of drying methods on the retention of bioactive compounds in African eggplant. *Food science & nutrition*, 6(4), 814-823.
- Morais, A. R. do V., Alencar, E. do N., Xavier Júnior, F. H., Oliveira, C. M. de, Marcelino, H. R., Barratt, G., et al. (2016). Freeze-drying of emulsified systems: A review. *International Journal of Pharmaceutics*, 503(1-2), 102e114. <https://doi.org/10.1016/J.IJPHARM.2016.02.047>.
- Mortier, S. T. F., Van Bockstal, P. J., Corver, J., Nopens, I., Gernaey, K. V., & De Beer, T. (2016). Uncertainty analysis as essential step in the establishment of the dynamic Design Space of primary drying during freeze-drying. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 103, 71-83.
- Nale, Z. (2021a). Mikroalglerin süt ürünlerinde kullanım imkânlarının değerlendirilmesi (Editör: Doç. Dr. Selmin ENER RÜŞEN) *Scientific Developments For Natural And Engineering Sciences* (197-210 s.s.), Ankara: Duvar Yayınları.
- Nale, Z. (2021b). Glütensiz gıda ürünlerinin geliştirilmesinde alternatif bir kaynak: Yalancı tahıl (Pseudocereal) tohumları (Editörler: Prof. Dr. Tahir POLAT, Doç. Dr. Mustafa OKANT) *Doğal Kaynakların Yenilikçi Ürünlere Sürdürülebilir Dönüşümü* (309-335 s.s.), Ankara: İKSAD Yayınevi
- Nale, Z. (2021c). Yenilikçi gıda ürünlerinin geliştirilmesinde alternatif bir kaynak: Mikroalgler. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 80-90
- Ngo, H. T., Tojo, S., Ban, T., & Chosa, T. (2017). Effects of prior freezing conditions on the quality of blueberries in a freeze-drying process. *Transactions of the ASABE*, 60(4), 1369.
- Nindo, C., Sun, T., Wang, S. W., Tang, J., & Powers, J. R. (2003). Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). *LWT-Food Science and Technology*, 36(5), 507-516.
- Nowak, D., & Jakubczyk, E. (2020). The freeze-drying of foods—The characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. *Foods*, 9(10), 1488.
- Nowak, D., Piechucka, P., Witrowa-Rajchert, D., & Wiktor, A. (2016). Impact of material structure on the course of freezing and freeze-drying and on the

- properties of dried substance, as exemplified by celery. *Journal of Food Engineering*, 180, 22-28.
- Oyinloye, T. M., & Yoon, W. B. (2020). Effect of freeze-drying on quality and grinding process of food produce: A review. *Processes*, 8(3), 354.
- Pisano, R. (2022). Automatic control of a freeze-drying process: Detection of the end point of primary drying. *Drying Technology*, 40(1), 140-157.
- Prosapio, V., Norton, I., & De Marco, I. (2017). Optimization of freeze-drying using a Life Cycle Assessment approach.
- Rajkumar, G., Shanmugam, S., Galvão, M. D. S., Leite Neta, M. T. S., Dutra Sandes, R. D., Mujumdar, A. S., & Narain, N. (2017). Comparative evaluation of physical properties and aroma profile of carrot slices subjected to hot air and freeze drying. *Drying Technology*, 35(6), 699-708.
- Reyes, A., Evseev, A., Mahn, A., Bubnovich, V., Bustos, R., & Scheuermann, E. (2011). Effect of operating conditions in freeze-drying on the nutritional properties of blueberries. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(3), 303-306.
- Rochelle do Vale Morais Morais, A., Xavier-Jr, F. H., do Nascimento Alencar, É., Melo de Oliveira, C., Dantas Santos, N., Antônio Silva-Júnior, A., ... & Sócrates Tabosa do Egito, E. (2019). Optimization of the freeze-drying process for microemulsion systems. *Drying Technology*, 37(14), 1745-1756.
- Rockinger, U., Funk, M., & Winter, G. (2021). Current approaches of preservation of cells during (freeze-) drying. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 110(8), 2873-2893.
- Różyło, R. (2020). Recent trends in methods used to obtain natural food colorants by freeze-drying. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 39-50.
- Sahni, E. K., & Pikal, M. J. (2017). Modeling the secondary drying stage of freeze drying: development and validation of an excel-based model. *Journal of pharmaceutical sciences*, 106(3), 779-791.
- Sérino, S., Costagliola, G., & Gomez, L. (2019). Lyophilized tomato plant material: Validation of a reliable extraction method for the analysis of vitamin C. *Journal of Food Composition and Analysis*, 81, 37-45.
- Sette, P., L. Franceschinis, C. Schebor, and D. Salvatori. 2017. Fruit snacks from raspberries: Influence of drying parameters on colour degradation and bioactive potential. *International Journal of Food Science & Technology* 52 (2):313–328. doi: 10.1111/ijfs.13283.
- Shan, Z. H. 2013. Research on the technology of producing raspberry by vacuum freeze-drying. *The Food Industry* 6:94–97.
- Shishegarha, F., Makhlof, J., & Ratti, C. (2002). Freeze-drying characteristics of strawberries. *Drying technology*, 20(1), 131-145.

- Sogi, D. S., Siddiq, M., & Dolan, K. D. (2015). Total phenolics, carotenoids and antioxidant properties of Tommy Atkin mango cubes as affected by drying techniques. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 564-568.
- Ubeyitogullari, A., & Ciftci, O. N. (2020). Fabrication of bioaerogels from camelina seed mucilage for food applications. *Food Hydrocolloids*, 102, 105597.
- Vallespir, F., Cárcel, J. A., Marra, F., Eim, V. S., & Simal, S. (2018). Improvement of mass transfer by freezing pre-treatment and ultrasound application on the convective drying of beetroot (*Beta vulgaris* L.). *Food and bioprocess technology*, 11(1), 72-83.
- Velardi, S. A., & Barresi, A. A. (2008). Development of simplified models for the freeze-drying process and investigation of the optimal operating conditions. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(1), 9-22.
- Yoon, K., & Narsimhan, V. (2022). Understanding heat transfer during the secondary drying stage of freeze drying: current practice and knowledge gaps. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 111(2), 368-381.
- Yu, Q., Li, J., & Fan, L. (2019). Effect of drying methods on the microstructure, bioactivity substances, and antityrosinase activity of asparagus stems. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(5), 1537-1545.

BÖLÜM 13

BİYOJEN AMİNLER

Şehriban Oğuz¹

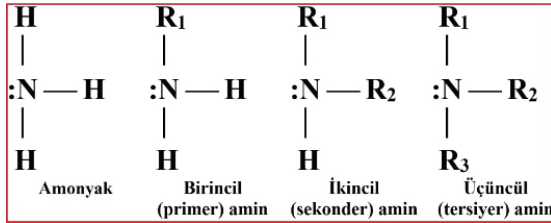
Seval Andiç²

1 Dr. Araştırma Görevlisi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Van-Türkiye, e-posta: sehribanoguz@yyu.edu.tr (ORCID ID: 0000-0001-6889-9487)

2 Prof. Dr., Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Van-Türkiye, e-posta: sevalandic@yyu.edu.tr (ORCID ID: 0000-0002-8306-0222)

GİRİŞ

Biyojen aminler bitki, hayvan ve mikroorganizma hücreleri için önem taşıyan düşük molekül ağırlıklı azotlu maddelerdir. Aminler, amonyaktaki hidrojen atomlarının alkil yada aril gibi organik radikallerle yer değiştirilmesi sonucu meydana gelirler. Amonyaktaki tek bir hidrojen atomunun organik radikallerle yer değiştirmesi sonucunda oluşan yapıya birincil (primer) amin, iki hidrojen atomunun organik radikallerle yer değiştirmesiyle oluşan yapıya ikincil (sekonder) amin ve üç hidrojen atomunun organik radikallerle yer değiştirmesiyle oluşan yapıya ise üçüncül (tersiyer) amin adı verilir (Cohen, 1988; Friestad, 2014). Bu aminler canlı hücreler tarafından üretildiğinde biyojen amin adını almaktadır (Silla Santos, 1996) (Şekil 1).

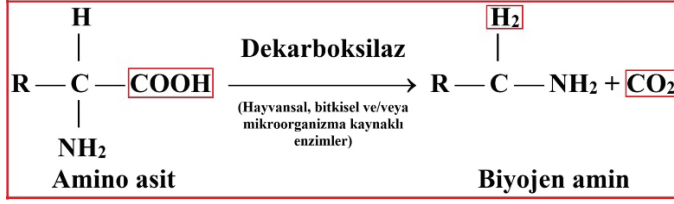


Şekil 1. Amonyaktan aminlerin oluşumu

Biyojen aminler bitki, hayvan ve mikroorganizmalar tarafından doğal olarak üretilen ve fizyolojik sistemlerdeki bazı süreçlerde rol alan önemli bileşenlerdir. Biyolojik sistemlerin doğal bileşenleri olan bu yapılar çeşitli etkilerle gıdalarda da oluşmaktadır. Gıdalarda biyojen aminler, aldehit ve ketonların aminasyon ve transaminasyonu yolu ile de üretilibilmelerine rağmen, esas olarak biyokimyasal ve/veya mikrobiyolojik etkileşimler sonucunda proteinlerden serbestleşen amino asitlerin mikrobiyel dekarboksilasyonu yolu ile oluşturulurlar. Bu süreçte rol alan enzimler ise dekarboksilaz enzimleridir. Bu enzimlerin aktivite gösterebilmeleri uygun koşulların oluşmasına bağlıdır. Mikroorganizma kaynaklı enzimler dışında, biyojen aminler hammadde kaynaklı enzimler tarafından da oluşturulabilirler (Silla Santos, 1996; Linares ve ark., 2011; Ruiz-Capillas ve Herrero, 2019). Ayrıca amino asitlerin dekarboksilasyonu, karbonil bileşiklerin önemli bir rol oynadığı termal işlemler aracılığı ile de gerçekleştirilebilmektedir (Zamora ve ark., 2012; Hidalgo ve ark., 2013; Hidalgo ve Zamora, 2016; Hidalgo ve Zamora, 2019).

Amino asitlerden enzimatik dekarboksilasyon yolu ile biyojen amin oluşumu, amino asitlerin karboksil kökünde meydana gelen değişim üzerinden gerçekleşmektedir. Öncül amino asitlere zayıf özgülük gösteren dekarboksilazların katalizlediği bu reaksiyonlarda, amino asitlerin kar-

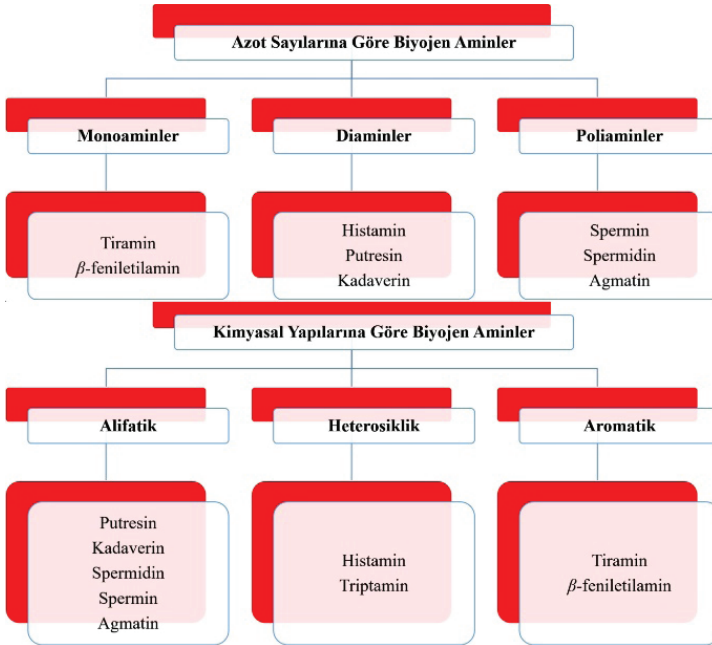
boksil kökü parçalanır ve ürün olarak biyojen aminlerle birlikte CO₂ oluşur (Erdag ve ark., 2019) (Şekil 2).



Şekil 2. Biyojen amin oluşumu

Biyojen aminler farklı şekillerde sınıflandırılabilirler. Kimyasal yapılarına göre alifatik, heterosiklik ve aromatik biyojen aminler olarak sınıflandırılırken yapılarında bulunan azot sayısına göre ise monoaminler, diaminler ve poliaminler olarak sınıflandırılırlar (Şekil 3) (Conca ve ark., 2001; Fiocco ve ark., 2007; Chattopadhyay ve ark., 2009; Linares ve ark., 2011; Düz ve Fidan, 2016; Örs-Gevrekçi, 2017).

Biyojen aminler öncül amino asitlerden, substratlarına karşı zayıf özgülük gösteren dekarboksilazlar aracılığı ile meydana gelirler. Bu biyojen aminler içerisinde histamin, kadaverin, spermidin, tiramin ve putresin gıdalar açısından önemlidir ve tazelik indikatörü olarak değerlendirilirler (He ve ark., 2017).



Şekil 3. Biyojen aminlerin sınıflandırılması

Yaygın olan biyojen aminler, öncül amino asitleri/biyojen aminleri ve meydana gelmelerinde rol oynayan enzimler Şekil 4’de verilmiştir (Williams-Ashman ve ark., 1972; Kalac ve ark., 1999; Arena ve ark., 2001; Marcobal ve ark., 2004; Lucas ve ark., 2007; Reitzer, 2014).

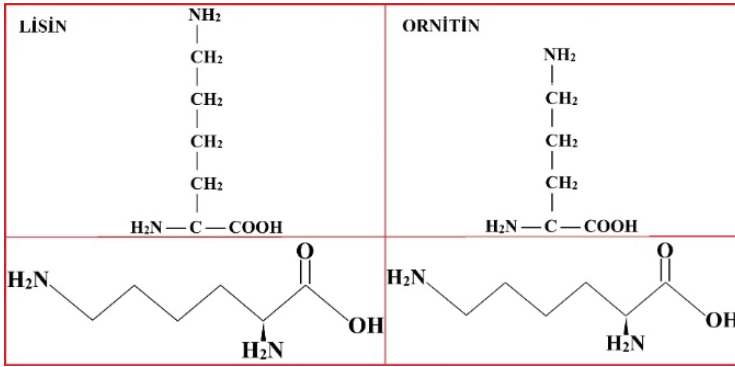
Substrat	Oluşumu Katalizleyen Enzim/Enzimler	Biyojen Amin
L- Histidin	Histidin dekarboksilaz	Histamin
L-lisin	Lisin dekarboksilaz	Kadaverin
L-lisin	Ornitin dekarboksilaz	Kadaverin
L-tirozin	Tirozin dekarboksilaz	Tiramin
L-triptofan	Triptofan dekarboksilaz	Triptamin
L-fenilalanin	Fenilalanin dekarboksilaz/Tirozin dekarboksilaz	β -Feniletilamin
L-arjinin	Arjinin dekarboksilaz	Agmatin
Agmatin	Agmatin deaminaz-Putresin karbamoiltransferaz - Karbamat kinaz	Putresin
L-ornitin	Ornitin dekarboksilaz	Putresin
Putresin	Spermidin sentaz	Spermidin
Spermidin	Spermin sentaz	Spermin

Şekil 4. Öncül amino asit/biyojen aminler, oluşumu katalizleyen enzim/enzimler ve oluşan biyojen aminler

En yaygın olan biyojen aminlerden histamin histidinden, kadaverin lisinden, tiramin tirozinden, triptamin triptofandan, β -feniletilamin feni-lalaninden, agmatin arjininden meydana gelmektedir. Putresin ise iki me-kanizma ile üretilabilmektedir. İlk olarak agmatin deaminaz, putresin kar-bamobiltransferaz ve karbamat kinaz enzimlerinin katalizlediği agmatin deaminaz sistemi ile agmatinden ve ikinci olarak ise L-ornitinin ornitin dekarboksilazlar aracılığı ile dekarboksile edilmesi sonucunda oluşurlar. Spermidin ve sperminin ise putresinden oluşmaktadır. Spermidin, spermi-din sentaz aracılığı ile putresinden, spermin ise spermin sentaz aracılığı ile spermidinden oluşur (Tao ve ark., 2021).

Dekarboksilazlar liyazlar grubunda yer alan enzimlerdir. Liyazlar grubu enzimler hidroliz ve oksidasyondan farklı bir yolla C-O, C-C ve C-N bağların kırılması reaksiyonlarında katalizör olarak rol oynarlar. Bu tip reaksiyonlarda ya substrat üzerindeki bir çift bağa bir grup eklenir

veya substrattan CO_2 veya H_2O gibi bir grup ayrılır ve geride çift bağa sahip bir madde kalır. Liyazlar grubunda yer alan dekarboksilaz enzimleri substrattan bir CO_2 ayrılmasını katalizlemektedir (Whitaker, 1996). Biyodegradatif dekarboksilazlar, substratlara karşı katı bir özgüllük göstermezler. Bazıları ortamda birincil amino asit substratları bulunmadığında veya diğer biyojen aminlere oranla daha düşük düzeyde bulunduğu, yapısal olarak benzer amino asitleri, (Şekil 5) diğer biyojenik aminleri oluşturmak için dekarboksile edebilirler. Örneğin lisin dekarboksilaz lisinden kadaverin, ornitin dekarboksilaz ise L-ornitinden putresin oluşturur. Ancak ornitin dekarboksilaz substrat olarak lisini de kullanabilmektedir. Eğer ortamda ornitin içeriği düşük lisin içeriği yüksek ise ornitin dekarboksilazlar lisini de substrat olarak kullanır ve kadaverin oluştururlar. Arginin dekarboksilazlar argininden agmatin oluştururlar. Aynı zamanda düşük düzeyde ornitini de dekarboksile ederler. Tirozini dekarboksile eden tirozin dekarboksilaz fenilanini de dekarboksile edebilir (Şekil 4) (Perley ve Stowe, 1966; Tabor ve Tabor, 1985; Joosten, 1988; Maijala ve ark., 1995; Kashiwagi ve ark., 1997; Pessione ve ark., 2009; Romano ve ark., 2013; Schneider ve ark., 2013; Oğuzhan-Yıldız ve Kırım, 2015; Ahmada ve ark., 2020).



Şekil 4. Ornitin dekarboksilaz tarafından substrat olarak kullanılan lisin ve ornitin

Biyojen Aminlerin Toksik Etkileri

Biyojen aminlerin bazıları hücre büyümesi ve çoğalmasında rol aldıkları için canlı metabolizmasında gerekli maddelerdir. Bazı biyojen aminler hormon ve protein sentezinin düzenlenmesinde, hücre membran stabilizasyonunda, nükleik asit fonksiyonlarının regülasyonunda, kan basıncının düzenlenmesinde, alerjik yanıtta, sinaptik iletimde ve düz kasların kasılmasında rol alırlar. Sinir sisteminde de önemli metabolik fonk-

siyonlara sahiptirler. Poliaminler ise bağışıklık sisteminde gereklidirler (ten Brink ve ark., 1990; Düz ve Fidan, 2016; EFSA, 2021). Ayrıca poliaminlerin antioksidan etkiye sahip oldukları da belirlenmiştir. Poliaminlerden spermin, spermidin ve putresinin çoklu doymamış yağ asitlerinin, tokoferol ve karatenoid pigmentlerinin oksidasyonunu engellediği ve bu etkinliklerinin moleküldeki amin grupları ile ilişkili olduğu bildirilmiştir (Løvaas, 1991).

Vücutta üretilen ve çeşitli fizyolojik süreçlerde rol oynayan endojen biyojen aminlerin yanında ekzojen aminlerde mevcuttur ve bu aminler vücutta çoğunlukla gıdalar aracılığı ile alınırlar. Biyojen aminler gıdalar için tazelik ve kalite göstergesidirler (Doeun ve ark., 2017). Gıdalarda başlıca mikroorganizma etkisi ile oluşturulduklarından, gıda zehirlenmelerine ve çeşitli farmakolojik reaksiyonlara neden olabildiklerinden gıdalar açısından hijyen ve risk göstergesi olarak kabul edilirler (Halasz ve ark., 1994; Shalaby, 1996; Gasarasi ve ark., 2003). Ayrıca bazı biyojen aminler gıdaların tat ve koku gibi özelliklerini de olumsuz yönde etkileyebilirler. Peynir, turşu, balık, soya ürünleri, yumurta, et ve et ürünleri, şarap ve bira biyojen amin bulunan gıdalar arasında sayılabilirler (Shalaby, 1996; Doeun ve ark., 2017).

Başlıca serbest amino asitlerden mikroorganizma kaynaklı enzimlerin etkisi ile oluşan biyojen aminler, bu koşulların varlığına bağlı olarak bir çok gıda maddesinde bulunmaktadır (ten Brink ve ark., 1990; Silla Santos, 1996). Bazı gıdaların yapısında doğal olarak bulunsalar da, biyojen aminler genellikle gıdaların fermantasyonu, olgulaştırılması ve/veya depolanması süreçlerinde, mikroorganizma kaynaklı dekarboksilaz enzimleri etkisiyle oluşturulurlar. Dekarboksilaz aktiviteye sahip mikroorganizmalar sadece bozulma yapan mikroorganizmalar değildir. Örneğin gıdaların üretiminde kullanılan starter kültürlerin bir kısmı da dekarboksilaz aktiviteye sahiptir ve biyojen amin oluşumuna yol açabilirler (Halasz ve ark., 1994; Silla Santos, 1996).

Vücutta gıdalar aracılığı ile alınan biyojen aminler, başlıca bağırsaklarda bulunan monoamin oksidaz, diamin oksidaz ve poliamin oksidaz enzimlerinin etkisi ile detoksifiye edilmektedir. Ancak bu mekanizma çeşitli faktör ve koşullar tarafından engellendiğinde ve/veya yavaşlatıldığında biyojen aminler vücutta birikerek toksikolojik sorunlar ve zehirlenme riski oluşturabilir (Ruiz-Capillas ve ark., 2004; EFSA, 2011). Alkol tüketimi, amin oksidaz inhibitörlerinin tüketimi, zayıf bağışıklık sistemi, sindirim ve emilim bozuklukları ve yüksek biyojen amin içerikli gıdaların tüketilmesi gibi nedenler vücuttaki detoksifikasyon mekanizmasını etkileyebilecek faktörler arasında sayılabilir. Ayrıca, zehirlenme oluşturmayacak düzeyde bir biyojen amin diğer biyojen aminlerin varlığında toksik

etki oluşturabilmektedir (Halász ve ark., 1994; Bardócz, 1995; Al Bulushi ve ark., 2009).

Gıdalarla vücuda alınan biyojen aminler nefes almada zorluk, kaşıntı, kızarıklık, kusma, ateş ve hipertansiyon ile karakterize edilen alerjik reaksiyonlara neden olabilmektedir (Naila ve ark., 2010). Gıdalarda doğal olarak bulunan putresin, agmatin, spermin ve spermidin gibi poliaminler ise nitritlerin varlığında nitrozaminlerin oluşmasına neden olurlar. Yapılan hayvan deneylerinde nitrozaminlerin kanserojen olduğu tespit edildiğinden insanlar için de potansiyel kanserojen olarak kabul edilirler. Kapsamlı deneysel ve bazı epidemiyolojik veriler bu bileşiklerin bazı gıdalarda bulunmasının yemek borusu ve mide kanserleri dahil olmak üzere belirli insan kanser türleri için etiyolojik bir risk faktörü olarak kabul edilebileceğini göstermektedir (Tricker ve Preussmann, 1991; Hernandez-Jover ve ark., 1997; Kalac, 2009; Kim ve ark., 2009; Drabik-Markiewicz ve ark., 2011). Ancak poliaminlerle ilişkili nitrozaminler, bir öğünde yalnızca büyük miktarlarda tüketildiklerinde risk oluştururlar (Kalac, 2009).

Tüm canlı organizmalarda biyojenik aminler fizyolojik süreçlerle ilişkilidirler (Munzi ve ark., 2021). Örneğin canlı organizmalarda bulunan putresin, spermidin ve spermin gibi alifatik poliaminler normal hücre büyümesi için gerekli maddelerdir. Ancak organizmada aşırı üretildiğinde veya dışarıdan alındığında vücutta birikerek hücre büyümesini inhibe eder veya protein sentezinin inhibisyonu yoluyla hücre canlılığının azalmasına neden olurlar (Pegg, 1982; Tabor ve Tabor, 1984; He ve ark., 1993; Fukuchi ve ark., 1995).

Scombroid (balık) zehirlenmesi olarak da bilinen histamin zehirlenmesi çok sık karşılaşılan bir problemdir ve bu zehirlenme vakalarında, gıda alerjilerine benzer semptomlar meydana geldiğinden sıklıkla gıda alerjileri ile karıştırılabilmektedir. Nefes almada güçlük ve boğulma hissi, bulantı ve kusma, ishal, karın krampları, ateş, kızarıklık, kaşıntı, karıncalanma, çarpıntı ve yüksek tansiyonla karakterizedir ve genellikle 500 ppm'den fazla histamin içeren gıdaların tüketilmesi sonucunda meydana gelmektedir (Murray ve ark., 1982; Taylor, 1986; Gonzaga ve ark., 2009; Özogul ve Özogul, 2019). Vücutta özellikle bağırsak sisteminde doğal olarak bulunan amin oksidazların genetik faktörlere bağlı olarak eksikliği veya amin oksidaz inhibitörlerinin kullanılması durumunda histamin zehirlenmesi meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, bu özelliklere sahip kişilerin histamin içeriği yüksek olması muhtemel fermente ve olgunlaştırılmış gıda gruplarını tüketme konusunda dikkatli olmaları gerekmektedir. Ayrıca histaminin etkisi diğer biyojen aminlerin varlığında artabilir. Örneğin zehirlenmeye neden olmayacak düzeyde histamin yanında putresin ve kadaverin gibi biyojen aminlerin varlığı, histamin oksitleyici enzimlerin inhibisyonuna yol açarak zehirlenmeye neden olabilir (Stratton ve ark.,

1991; Hernandez-Jover ve ark., 1997; Emborg ve Dalgaard, 2006; Yongmei ve ark., 2009). Spermin ve spermidin ise histaminin bağırsaklardan emilimini artırır (Chu ve Bjeldanes, 1981).

Avrupa Ekonomik Topluluğu düzenlemelerine göre raf ömrü süresince yüksek miktarda histidin ile ilişkili balık türlerinden elde edilen balıkçılık ürünleri için histamin seviyesi 100-200 ppm ve balık ürünlerinin fermantasyonu ile üretilen balık sosu için 400 ppm ile sınırlandırılmıştır (EU Regulation EC No 2073/2005).

Yüksek seviyelerde tiramin peynir reaksiyonu olarak bilinen ve histamin zehirlenmesiyle benzer semptomların görüldüğü bir zehirlenmeye neden olabilir. Peynir tüketimi sonrasında gözlemlendiği için bu ismi almıştır. Tiraminin ilk izole edildiği gıda da peynirdir ve Yunanca peynir anlamına gelen “tyros” kelimesinden türetilmiştir (Ruiz-Capillas ve Jiménez-Colmenero, 2004; Rao ve Yeragani, 2009; Pegg, 2013; Benkerroum, 2016). Tiramin sempatik sinir sisteminden noradrenalin salgılanmasına neden olur ve buna bağlı olarak kan basıncı ve kalp debisi artar. Tiraminin 6 mg dozu bile kan basıncının artmasına neden olabilmektedir. Kişisel farklılıklara bağlı olarak bireylerde tehlikeli doz 25 mg düzeyidir (Blackwell ve Mabbitt, 1965; Stratton ve ark., 1991; Pegg, 2013; Kalac, 2014). Tiramin ayrıca migren, solunum hızının yükselmesi, göz yaşarması ve kan şekeri seviyesinin artmasına neden olur. Bu biyojen amin için belirlenen akut toksisite seviyesi 2000 ppm’in üzerindeki seviyelerdir (Stratton ve ark., 1991; Til ve ark., 1997; Naila ve ark., 2010; Pegg, 2013; Kalac, 2014). Triptamin de vazodilatör biyojen aminlerden biridir. Kan basıncının artmasına neden olur ve diamin oksidaz enzimleri tarafından inhibe edilir (Ordóñez ve ark., 1997; San Mauro Martín ve ark., 2016).

β -feniletilamin de tiramin gibi sempatik sinir sisteminden noradrenalin salgılanmasına neden olarak kan basıncının artmasına neden olur. Kan basıncının artması ise kalp yetmezliği ve beyin kanaması risklerini doğurur. β -feniletilamin ayrıca histaminin toksisitesini artırır ve diyetle ilgili olarak gelişen migren, baş dönmesi ve huzursuzluk ile de ilişkilendirilir (Lüthy ve Schlatter, 1983; Stratton ve ark., 1991; Premont ve ark., 2001; Millichap ve Yee, 2003). Bu biyojen amin için bildirilen toksik eşik değeri 30 ppm’dir (ten Brink ve ark., 1990).

Putresin ve kadaverin özellikle fermente gıdalarda, balık ve balık ürünlerinde ve olgunlaştırılmış peynirlerde yüksek miktarda bulunan biyojen aminlerdir. Her iki biyojen aminde sitotoksik etkiye sahiptir. Ancak kadaverinin sitotoksik eşik değeri putresinin sitotoksik eşik değerinin iki katıdır (del Rio ve ark., 2019). Vazodilatör etkiye sahip bu biyojen aminler damar genişlemesi, hipotansiyon, bradikardi (düşük kalp hızı), çene, kol ve bacaklarda parezi ile ilişkilendirilmiştir. Putresin nitrit ile reaksiyona

girerek kanserojen heterosiklik bileşikler oluşturur (Benkerroum, 2016; Biji ve ark., 2016, Atakisi ve Merhan, 2017). Ayrıca ortamda bulunan diğer aminlerin toksitesini arttırmaktadır (Shalaby, 1996; Ladero ve ark., 2010). Putresin ve kadaverin için insanlardaki toksik doz değeri belirlenmemiştir. Ancak Wistar sıçanları ile yapılan hayvan deneyinde gözlenememiş yan etki seviyesi (NOAEL) 2000 ppm olarak bulunmuştur (Til ve ark., 1997).

Poliaminler grubunda bulunan spermidin ve spermin gıda alerjilerine benzer belirtilere neden olabilirler (Kalac, 2014). Histaminle birlikte bulunduklarında bu biyojen aminin sindirim sisteminde emilimini arttırırlar. Bazı katabolik yan ürünleri kanser, nörodejeneratif hastalıklar, inme ve böbrek yetmezliği gibi çeşitli patolojik durumların etiyolojisine katkıda bulunabilir (Pegg, 2013). Ayrıca aşırı spermin retinal pigment epitel hücreleri için sitotoksik etkiye sahiptir ve dejenerasyon mekanizmasına dahil olabilir (Kaneko ve ark., 2007). Hayvan deneyleri ile spermidin ve spermin için belirlenen oral akut toksisite değerleri 600 ppm'dir. Gözlemlenmeyen yan etki düzeyleri (NOAEL) ise spermidin için 83 ppm ve spermin için 19 ppm vücut ağırlığıdır (Til ve ark., 1997).

Biyojen Amin Üreten Mikroorganizmalar

Biyojen aminler, çeşitli gıdalarda bulunmakta ve esas olarak serbest amino asitleri dekarboksile etme yeteneğine (dekarboksilaz enzimi) sahip mikroorganizmalar aracılığı ile üretilmektedirler (Shalaby, 1996; Agüero ve ark., 2020). Bununla birlikte, mikroorganizmaların aminoasitleri dekarboksile etme yeteneği oldukça değişken olup türe ve çevresel koşullara bağlı olarak değişmektedir (Landete ve ark., 2007).

Mikroorganizmaların biyojen amin üretilip üretilmediği, dekarboksilaz besiyeri ortamında bulunan amino asidi dekarboksile etme yeteneğine göre (fenotipik olarak) veya ilgili dekarboksilaz enzimine sahip gen bölgesini taşıyıp taşımadığına göre (moleküler olarak) belirlenebilmektedir (Bover-Cid ve Holzapfel, 1999; Landete ve ark., 2007). Dekarboksilaz besiyerleri diferansiyel besiyeri olarak hazırlanmakta ve ilgili enzimin varlığı besiyerine eklenen pH indikatörünün (bromkresol moru, kresol kırmızısı gibi) renk değiştirmesine göre belirlenmektedir (Bover-Cid ve Holzapfel, 1999). Bu yöntemle ilave olarak, oksidaz enziminin histamin üzerindeki etkisine bağlı olarak ortamda hidrojen peroksidin oluşup oluşmadığına göre, bakterilerin histamin üretilip üretilmediği tespit edilebilmektedir (Sumner ve Taylor, 1989; Feng ve ark., 2018). Moleküler tekniğe dayanan gen bölgesinin tespiti ile kültürel yöntemlerden daha hızlı ve güvenilir sonuçlar alınarak, gıdalarda potansiyel biyojen amin oluşma riski tespit edilebilmektedir (Landete ve ark., 2007; Barbieri ve ark., 2019). Bakterilerde histidin dekarboksilaz (hdc), tirozin dekarboksilaz (tdc), li-

zin dekarboksilaz (ldc) ve ornitin dekarboksilaz (odc) gen bölgeleri PCR yöntemi ile tespit edilebilmektedir. Bu genler kromozomlar üzerinde bulunabildiği gibi bazı durumlarda plazmid üzerinde de bulunabilir ve/veya yatay gen transferi ile kazanılmış olabilir. Bu nedenle bu genleri taşıyan her bakteri fenotipik olarak biyojen amin üreticisi olmayabilmektedir. Biyojen aminlerin oluşumunda sıcaklık, pH, tuz konsantrasyonu, ortamdaki oksijen miktarı, mikroorganizmanın türü ve suşu gibi çeşitli faktörler etkili olmaktadır (Kankaya ve ark., 2017; Barbieri ve ark., 2019; Câmara ve ark., 2020).

Bir gıdada oluşan biyojen amin miktarı ve türü, ürünün yapısına ve o üründe bulunan mikroorganizma grubuna göre değişmektedir (Halász ve ark., 1994). Dekarboksilaz-pozitif mikroorganizmalar, gıdanın doğal mikroflorasında bulunabileceği gibi gıdanın işlenmesinden önce, işlem sırasında veya işlem sonrasında kontaminasyon yoluyla da gıda maddelerine bulaşabilmektelerdir (Bover-Cid ve ark., 2001, Simon-Sarkadi, 2017).

Bacillus, *Citrobacter*, *Clostridium*, *Escherichia*, *Klebsiella*, *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Photobacterium*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Shigella* ve *Streptococcus* cinlerine ait tür veya alt suşlar, sahip oldukları aminoasit dekarboksilaz enzimleri sayesinde bir veya daha fazla aminoasidi dekarboksile etme yeteneğine sahiptirler. Bazen bir bakteri ailesine ait alt türler, belirli bir dekarboksilaz enzimine sahip olup sadece belirli biyojen aminleri oluşturabilmektedir. *Enterobacteriaceae* ailesine ait bakteri türlerinin sadece putresin ve/veya kadaverin üretebilmesi buna en iyi örnektir. Bazen de bir cinse ait bakterilerde meydana gelen büyük tür varyasyonlarının bir sonucu olarak (*Lactobacillus* grubundan sadece birkaç türün histidin dekarboksilaz pozitif olması) dekarboksilaz enzim üretme yeteneği kazanılmıştır (ten Brink ve ark., 1990).

Bazı kaynaklarda biyojen amin üretimi maya, gram-pozitif ve gram-negatif bakterilerle ilişkilendirilmektedir. *Debaryomyces hansenii*, *Yarrowia lipolytica*, *Pichia jadinii* ve *Geotrichum candidum* gibi birkaç maya türü potansiyel biyojen amin üreticisi olarak tanımlanmıştır (Lineas ve ark., 2011; Alvarez ve Moreno-Arribasb, 2014).

Acromonas hydrophila, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Hafnia alvei*, *Pseudomonas* spp., *Proteus morganii*, *Serratia* spp. ve *Vibrio alginolyticus* gibi bazı gram negatif bakteriler de dekarboksilaz enzimi üretme yeteneğine sahiptirler. Histamin en çok üretilen biyojen amin iken *Enterobacteriaceae* ailesine ait türler putresin ve kadaverin oluşturmaktadır. Bununla birlikte, gıda maddelerinde bu bakterilerin varlığı yeterli hijyen önlemlerine tam olarak uyulmadığının ve üretimin farklı aşamalarında meydana gelen kontaminasyonun bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Bu durum aynı zamanda genel bir gıda güvenliği indi-

katörü olarak değerlendirilmektedir. Biyojen amin konsantrasyonu, fermente edilmemiş gıdalarda mikrobiyel bozulmanın bir göstergesi olarak da kullanılmaktadır (Lineras ve ark., 2011; Alvarez ve Moreno-Arribasb, 2014; Costa ve ark., 2018).

Gram-pozitif bakteriler, özellikle laktik asit bakterileri (LAB: *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Lactococcus*, *Enterococcus* ve *Streptococcus*), fermente ürünlerdeki biyojen amin oluşumundan sorumludurlar. Biyojen amin üreten LAB, fermente gıdaların doğal mikroflorasında bulunabileceği gibi bu gıdaların üretimi sırasında starter, yardımcı veya probiyotik kültür olarak da eklenmiş olabilirler. Biyojen aminlerin oluşmasında ortamdaki serbest amino asitler substrat olarak kullanıldığı için eklenen kültürlerin proteolitik aktivitesi de önem arz etmektedir. Bu bakterilerin tespit edildiği ürünlerde putresin, histamin, kadaverin ve tiramin tespit edilmiştir. Peynir, biyojen amin içeriği en yüksek fermente süt ürünü iken histamin ve tiramin daha çok üretilen biyojen aminlerdir. *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Lactococcus* ve *Streptococcus* cinslerine ait türler sütün doğal florasında bulunabildiği gibi süt ürünlerinin işlenmesinden önce, işlem sırasında veya sonrasında kontaminasyon yoluyla da bulaşmış olabilirler (Halász ve ark., 1994; Karahan, 2003; Göncü ve ark., 2017). Peynirde biyojen amin oluşumu üzerinde çiğ sütün türü, sütün başlangıç mikrobiyel yükü, starter kültür kullanılıp kullanılmaması, seçilen starter kültürün türü, olgunlaşma koşulları ve süresi gibi çeşitli faktörler etki etmektedir. Özellikle çiğ süttten üretilen geleneksel peynirlerdeki mikroflorada bulunan *Enterococcus* cinsine ait türler ve alt suşlar biyojen amin oluşumundan sorumludur (Spano ve ark., 2010; Büyük ve Marangoz, 2018; Simon-Sarkadi, 2019). Enterokokların biyojen amin üreticisi bakteriler olduğu yapılan pek çok çalışmada belirtilmiştir (Kučerová ve ark., 2009; Şanlı ve Şenel, 2015). Dekarboksilaz enzimi bulunmayan starter kültürlerin tercih edilmesi biyojen aminlerin oluşumunu azaltabilmektedir. Fermente et ürünlerinden sucuk üretiminde kullanılan starter kültürlerin, starter olmayan laktik asit bakterileri ile rekabet etmesi sonucu ürün kalitesinde artış görülürken biyojen amin oluşumunda da azalma olduğu belirtilmiştir (Akan ve Demirağ, 2017).

Biyojen Aminlerin Belirlenme Yöntemleri

Gıdalardaki biyojen aminlerin potansiyel toksik etkilerini değerlendirebilmek için gıda içerisinde hangi biyojen aminlerin oluştuğunun ve oluşan biyojen aminlerin miktarlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Farklı gıdalardaki biyojen amin seviyelerini belirleyebilmek için bir dizi analitik ve hızlı tanı yöntemleri geliştirilmiştir (Ruiz-Capillas ve Herrero, 2019). Bu yöntemler, balıkta histamini saptamak için kullanılan enzim immunoassay'e dayalı hızlı ticari kitler (ELISA), fermente içeceklerde-

ki biyojen aminleri belirlemek için geliştirilen sensörler olabileceği gibi birkaç biyojen aminin eş zamanlı belirlenmesine olanak sağlayan kromatografik yöntemler de olabilmektedir. İnce tabaka kromatografisi (TLC), gaz kromatografisi (GC), kapiler elektrofez (CE), yüksek performans sıvı kromatografisi (HPLC) biyojen aminlerin tespit edilmesinde en sık kullanılan kromatografik yöntemlerdir (García-Moruno ve ark., 2005; Önal, 2007, Ruiz-Capillas ve Herrero, 2019).

Katı bir makrikteki serbest biyojen aminler oda sıcaklığındaki veya daha yüksek sıcaklıklardaki su ile ekstrakte edilebilirken makriks yapısına bağlı bulunan biyojen aminlerin ise bir asit ortamında [hidroklorik asit (HCl), perklorik asit (HClO₄) veya trikloroasetik asit (TCA)]ekstrakte edilmesi gerekmektedir. Biyojen aminlerin tespiti için kullanılan tüm yöntemlerde biyojen aminlerin ekstraksiyonu, saflaştırılması ve türevlendirilmesi en önemli işlem basamaklarını oluşturmaktadır (Moret ve Conte, 1996; Özdestan ve Üren, 2006; Lázaro de la Torre ve Conte-Júnior, 2013).

Biyojen aminler daha çok fermente ve olgunlaştırılmış gıdalar, balık ve balık ürünleri, et ürünleri, peynir çeşitleri gibi gıdalarda tespit edilmektedir. Bu gıdalardan bazıları, tespit edilen biyojen aminler ve tespit yöntemleri Tablo1’de verilmiştir.

İnce tabaka kromatografisi (TLC)

İnce tabaka kromatografisi (TLC), şarapta sorbik asit, yapay tatlandırıcılar ve sükrozun saptanmasında rutin olarak kullanılabilen bir yöntem olsa da balık, et ve peynirdeki biyojen aminlerin belirlenmesinde de kullanılabilir (Romano ve ark., 2012). TLC ağır ve/veya maliyetli ekipman gerektirmeyen, hızlı ve kolay uygulanan bir yöntemdir. Yöntem birkaç numunenin eş zamanlı analizine izin vermektedir. Bu özellikleri ile HPLC’ye alternatif bir yöntem gibi görünse de yapılan çalışmalarda kullanılan metotların aşırı süre gerektirdiği ve hatalı/kesin olmayan sonuçlar (yarı kantitatif) verebildiği belirtilmiştir (Shalaby, 1999; Romano ve ark., 2012). Sonraki dönemlerde ise TLC için durağan fazlar, otomatik numune uygulaması ve dansitometrik tarama araçlarındaki gelişmeler ile HPLC’den elde edilen sonuçlara benzer değerler tespit edilebilmiştir. Bu yöntem, enstrümantal analiz için yeterli donanımı olmayan tüm laboratuvarlarda basit, hızlı ve ucuz bir yöntem olarak kullanılabilir (Lapa-Guimarães ve Pickova, 2004; Romano ve ark., 2012).

Biyojen aminler, kromatografik yürüme (ilerleme) sırasında çizgilenme eğiliminde olan oldukça polar maddelerdir. Bu nedenle TLC plakasına uygulanmadan önce türevlerine dönüştürülmelidir. Biyojen aminlerin türevlendirilmesinde kullanılan en yaygın reaktif, dansil klorürdür. Hidroliz ürünü olan dansil sülfonattan solvent ekstraksiyonu ile kolayca izole edilen ve gelişmiş kromatografik özelliklere sahip olan dansil klorür, hem

birincil hem de ikincil biyojen aminler ile yüksek derecede floresan sülfonamid türevleri vermektedir. Biyojen aminlerin dansil türevleri, floresan özelliklerinden dolayı UV ışığı altında kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Türevlendirilmiş biyojen aminler, selüloz veya silika jel ile kaplanmış cam veya alimünyum plakalara (20 x 20 cm) cam kapiler veya otomatik pipetler ile spotlandıktan sonra plakalar yürütme tankına yerleştirilmektedir. Sürenin bitiminden sonra plakalar tanktan çıkarılmakta ve plaka kuruduktan sonra üzerine floresans özelliği artıran izopropanol:trietanolamin karışımı gibi maddeler püskürtülmektedir. Akabinde ise plakalar belirli dalga boyunda (254 nm, 365 nm gibi) densitometre altında kantitatif olarak değerlendirilmektedir (Sherma, 2000; Shakila ve ark., 2001; García-Moruno ve ark., 2005).

TLC ile biyojen amin türevlerinin ayrılmasında çeşitli solvent sistemleri (kloroform-dietileter-trietilamin, kloroform-trietilamin gibi) değerlendirilmiş ve kullanılmıştır. Yüksek toksisitesine rağmen benzen yaygın olarak kullanılmaktadır (Lapa-Guimarães ve Pickova, 2004; García-Moruno ve ark., 2005).

Tablo1: Biyojen amin içeren bazı gıdalar, tespit edilen biyojen aminler ve tespit yöntemleri

Ürün	Biyojen amin türü	Tespit yöntemi	Kaynak
Lahana turşusu	Try, Put, Cad, Tyr, Spr, Spm	HPLC	Yücel ve Üren, 2008
Sucuk	Try, Phe, Put, Cad, His, Tyr, Spr, Spm	HPLC	Gençcelep ve ark., 2008
Kefir	Put, Cad, Spr	HPLC	Özdestan ve Üren, 2010
Otlı peynir	Try, His, Phe, Tyr, Put, Cad	HPLC	Andiç ve ark., 2010
Portakal suyu	Try, Phe, Put, His, Tyr, Spr	μ -SPE-HPLC	Basheer ve ark., 2011
Sofralık siyah zeytin	Put, Cad, Tyr	HPLC	Özdestan ve ark., 2011
Kırmızı Şarap	Phe, His, Put, Tyr, Cad, Spr, Try, Isoamlyl amine	HPLC	Konakovsky ve ark., 2011
Bira	Put, Tyr, Cad, dimetilamin, pirolidin, 1,3-diaminopropan	DLLME - GC/MS	Almeida ve ark., 2012
Balık ve balık ürünleri	His, Try, Put, Phe, Cad, Tyr, Spr, Spm	ters faz HPLC	Zhai ve ark., 2012

Balık ürünü	Try, Phe, Put, Cad, His, Tyr, Spr, Spm	HPLC	Köse ve ark., 2012
Şarap	His, Tyr, Spr, Spm, Put, Cad, vPhe	HPLC	Pineda ve ark., 2012
Kakao	Phe, Try, Tyr, Dopamin, Serotonin	UHPLC	Oracz ve Nebesny, 2014
Bira ve şarap	Try, Phe, Put, Cad, His, Tyr, Spr, Spm	CE-MS	Daniel ve ark., 2015
Şalgamdan izole edilen LAB	Agm, Tyr, Put	HPLC	Mete ve ark., 2017
Ezine peyniri	His, Put, Cad, Tyr, Try, Phe	HPLC	Diler ve ark., 2018
Peynir	Tyr, Put, Cad	RP-HPLC	Bonczar ve ark., 2018
Balık ve balık ürünleri	His, Put, Cad, Tyr, Agm.	IC-MS/MS	Koçar ve ark., 2021
Balık	His	Biosensor	Zeng ve ark., 2021
<i>His: Histamin; Tyr: Tiramini; Try: Triptamin Spr: Spermidin; Spm: Spermin; Put: Putresin; Cad: Kadaverin; Phe: Feniletilamin; Agm: Agmatin</i>			

Kapiler jel elektroforezi

Kapiler elektroforez (CE), örneklere ait analitlerin yüksek elektrik alan altında yük farklılıklarına göre hareket etmesine dayanan hızlı ve yüksek ayırma gücüne sahip bir tespit yöntemidir (Oguri, 2000; Kahraman, 2012).

Kapiler elektroforez tekniği ile ayırma işlemi, içerisinde polimer veya jel çözelti bulunan 40 ile 100 cm uzunluğundaki kapiler tüpte gerçekleştirilmektedir. İç çapı 10 veya 100 µm olan kapiler tüp, platin elektrotların yer aldığı iki tampon haznesi arasına yerleştirilmektedir. Tüpün bir ucundan örnek verilirken elektrotlar arasında 20 ile 30 kV'lık doğru akım potansiyeli uygulanmakta ve ayırma sağlanmaktadır. Yöntemin prensibi analite ait iyonların elektriksel alandaki göç hızı farklılığına dayanır. Bu analiz yöntemi oldukça hızlıdır ve çok az hacimdeki numuneleri bile ayırt etme üstünlüğüne sahiptir. Ayrıca kullanılan çözelti miktarının az olması ve sonuçların tekrarlanabilir olması bu yöntemin diğer avantajlarıdır (Önal, 2007).

Kapiler elektroforez-lazerle indüklenen floresans dedektörü, kapiler elektroforez-iletkenlik dedektörü, miseller elektrokinetik kapiler kromatografi-lazerle indüklenen floresans dedektörü, kapiler elektroforez-amperometrik dedektörü ve kapiler zon elektroforezi-lamba ile indüklenen

floresans dedektörü gıdalardaki biyojen aminlerin analizinde kullanılan kapiler elektroforez sistemleridir (Özdestan, 2009).

Gaz kromatografisi

Gaz kromatografisi, gıda numunelerinde biyojen aminlerin belirlenmesi için sıvı kromatografisi veya kapiler elektroforez kadar yaygın olarak kullanılmamaktadır. Biyojen aminler uçucu özelliğe sahip olmadıkları için analizden önce analitlerin özelliklerini değiştirmek, yani uçucu özelliklerini artırmak ve biyojen aminlerin polaritelerini azaltmak için analitlerin türevlendirilmesi gerekmektedir. Nihai belirleme için kullanılan saptama tekniğine bağlı olarak farklı türevlendirme reaktifleri uygulanabilmektedir. Pentaflorobenzoil klorür ve alkilenlenmiş kloroformatlar (en popüler olanı) türevlendirme için kullanılan maddelerdir. Bu bileşiklerin avantajı türevlendirme reaksiyonunun sulu bir bazik solüsyonda gerçekleştirilebilmesidir. Ayrıca, türevlendirme işleminin oda sıcaklığında kısa sürede gerçekleşmesini de sağlamaktadırlar (Papageorgiou ve ark., 2017). Fakat türevlendirme işleminin sık kullanılması ve kolonda oluşabilen atıklar nedeniyle çok tercih edilen bir yöntem değildir (Düz ve Fidan, 2016).

Gaz kromatografisi, sıvı kromatografisine alternatif yöntemler sunmak için bazı araştırmacılar tarafından fermente içeceklerdeki biyojen amin tespitinde özel olarak kullanılmıştır. Bu yöntemdeki türevlendirme prosedürü ve genel analiz süresinin bazı sıvı kromatografisi yöntemlerinden daha hızlı olduğu belirlenmiştir. Son zamanlarda, katı faz mikro ekstraksiyon (SPME) veya dispersif sıvı-sıvı mikro ekstraksiyon (DLLME) ile birleştirilerek balık veya alkollü içecekler gibi gıda numunelerinde biyojen aminlerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bildirilen yöntemlerin verimli ve yüksek oranda tekrarlanabilir olduğu ve daha yüksek sayıda biyojen aminlerin doğru bir şekilde tanımlanmasına ve miktarının belirlenmesine olanak sağladığı da ifade edilmektedir (Almeida ve ark., 2012; Wojnowski ve ark., 2019).

Yüksek performans sıvı kromatografisi (HPLC)

Biyojen aminlerin analizlerinde en sık kullanılan yöntem yüksek performans sıvı kromatografisi (HPLC) yöntemidir. Bu yöntemde en çok C18 kolon kullanılmaktadır. Analiz sırasındaki ilk işlem, biyojen aminlerin ekstraksiyonu ve saflaştırma işlemleridir. Hem geri kazanım kaybının olmaması hem de kromatogramda istenmeyen piklerin oluşmaması için bu işlemlerin oldukça dikkatli yapılması gerekmektedir. Şarap, bira, turşu gibi maktriiks yapı içermeyen gıdalarda ekstraksiyon ve saflaştırma işlemine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu sebeple örnek hazırlanırken süzme ve santrifüj işlemlerini uygulamak yeterlidir (Özdestan ve Üren, 2006).

Biyojen aminler, görünür veya ultraviyole dalga boylarında düşük absorpsiyon sergilemeleri nedeniyle floresans göstermezler. Bu nedenle de ekstraktları HPLC dedektörlerinde (floresans ve kırılma indisi dedektörlerinde) direkt okunamazlar. Biyojen aminlerin belirlenmesinde duyarlılığı ve seçiciliği artırmak için genellikle kolon öncesi veya kolon sonrası benzoil klorür, orto-fitaldialdehit (OPA), dansil veya dabsil klorür ile türevlendirilmelidir. Bu işlem, aynı zamanda analiz edilecek bileşiklerin polaritesini azaltarak ters faz kolonlarındaki ayrımı iyileştirmek için de uygulanmaktadır. Dansil klorür, kromatografik özellikleri iyileştiren ve solvent ekstraksiyonu ile kolayca izole edilebilen, yüksek floresans tepkisi ve nispeten kararlı sülfonamid türevleri vermektedir. (Önal, 2007; Mohammed ve ark., 2016; Papageorgiou ve ark., 2017). Çeşitli kaynaklarda 4-kloro-3,5 dinitrobenzotriflorür (CNBF), dietil etoksimetilenmalonat (DEEMM), 6-aminokinolil-N-hidroksisüksinimidil karbamat (AQC), 9-H-floren-9-ilmetil kloroformat (FMOC-Cl) veya 1-floro-2,4-dinitrobenzen gibi türevlendirme ajanlarının da kullanıldığı bildirilmiştir. Türevlendirme ajanının seçimi dedektöre, kromatografik tekniğe ve analiz edilen bileşiklerin yapısına bağlı olarak değişmektedir. Biyojen aminlerin tespitinde ters faz sıvı kromatografisi (RF-HPLC)'de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede türevlendirme sırasında oluşabilecek analit kaybının önüne geçilerek geri kazanımın artması hedeflenmiştir (Nalazek-Rudnicka ve ark., 2020).

Absorbans, floresans ve kırılma indisi dedektörleri HPLC cihazında en çok kullanılan dedektörleridir. Elektromanyetik radyasyonu absorplamadıkları için histamin, tiramin, β -feniletilamin ve triptamin dışındaki biyojen aminler absorbans dedektöründe okunamamaktadır (Özdekan, 2009).

Diğer yöntemler

Biyojen aminlerin tespitinde kullanılan kromatografik yöntemlerin ön hazırlık aşamalarının uzun olması, uzman personel gerekliliği, analizin zaman alması ve pahalı olması gibi bir takım dezavantajları bulunmaktadır. Buna bağlı olarak çeşitli alternatif yöntemler ile biyojen aminlerin tespitine olanak sağlayan biyosensörler ve enzim bağlı immunosorbent test (ELISA) kiti geliştirilmiştir (Kaçar ve Dalkıran, 2020).

Biyosensörler, analiz edilecek bileşen ile seçici bir şekilde etkileşime girerek, bunun sonucunda ortaya çıkan sinyalin bir iletici sistemle ölçülmesi prensibine dayanan bir yöntemdir (Chen ve ark., 2011). Biyojen amin sensörleri, biyojenik aminlerin aldehit veya amonyağa oksidatif deaminasyonunu katalize eden amin oksidazların veya amin dehidrojenazların varlığında oluşan sinyallerin ölçülmesine dayanmaktadır (Vasconcelos ve ark., 2021). Özel bir ekipman gerektirmedikleri gibi biyojen

aminlerin ekstraksiyonu ve türevlendirilmesi prosedürlerine ihtiyaç duyulmayan sistemlerdir. Ayrıca, biyojen aminlerin sensörler ile analizi kısa analiz süresi, düşük maliyeti ve basitliği nedeniyle oldukça dikkat çekici bir yaklaşım olmuştur. Bu tekniğin diğer bir önemli avantajı ise yerinde analiz için kullanılabilmesidir (Ordóñez ve ark., 2016).

ELISA, ticari olarak üretilen bir kit çeşidi olup örnekteki histamin oksidasyonunu katalize eden bir dehidrojenaz enzimine veya histaminin seçici bir bağ oluşturmamasını sağlayan bir antikor prensibine dayanmaktadır (Feng ve ark., 2018). ELISA'nın gıdadaki histaminin basit ve hızlı bir şekilde belirlenmesi için güvenilir bir yöntem olduğu belirtilmektedir (Simon-Sarkadi ve ark., 2003). Bu yöntem, birçok örnekte histamin içeriğinin hızlı ve kesin bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır. Analiz sırasında komplike bir cihaz gerekmezken işlem kolay ve basittir (Leszczyńska ve ark., 2004).

SONUÇ

Biyojen aminler canlı hücreleri tarafından üretilen ve çeşitli fizyolojik süreçlerde rol alan bileşenlerdir. İnsanlar, metabolizma ürünleri olan bu endojen biyojen aminler yanında, gıdalar aracılığı ile ekzojen kaynaklı biyojen aminleri de vücutlarına alabilirler. Gıdalarda biyojen aminler çoğunlukla mikroorganizma kaynaklı dekarboksilaz enzimleri aracılığı ile serbest amino asitlerden üretilir. Gıdalarda bulunan en yaygın biyojen aminler histamin, tiramin, triptamin, putresin, spermidin, spermin, agmatin ve β -feniletilamin'dir. Bu biyojen aminler çoğunlukla gıdaların olgunlaştırılması, depolanması ve fermantasyonu süreçlerinde oluşurlar ve gıdalar için tazelik ve hijyen indikatörü olarak kabul edilirler. Biyojen amin tespit edilen gıdalar arasında fermente gıdalar, olgunlaştırılmış peynir çeşitleri, balık ve balık ürünleri, et ürünleri, fermente sebzeler ve fermente içecekler sayılabilir. Gıdalar aracılığı ile vücuda yüksek miktarda alınan biyojen aminler toksik etki gösterebilirler. Hatta bazı biyojen aminler düşük düzeydeki diğer bir biyojen aminin toksitesitesini ya da sindirim sisteminden emilimini arttırabilir. Aslında insanların sindirim sisteminde biyojen aminlerin etkilerini bloke eden amin oksidaz enzimleri mevcuttur. Ancak genetik olarak bu enzimlerin yokluğu ve/veya eksikliği ve bazı koşullara bağlı olarak inhibe edilmeleri sonucunda toksik etki meydana gelir. Biyojen aminler tüketicilerde ateş, kızarıklık, solunum güçlüğü, kaşıntı, kusma gibi belirtilerle karakterize alerjik reaksiyonlara neden olabilirler. Vazoaktif biyojen aminler kan basıncının yükselmesi ve bununla bağlantılı olarak kalp yetmezliği ve beyin kanamalarına neden olabilirken, bazı biyojen aminler migren, çene kilitlenmesi ve kol ve bacaklarda felçle ilişkilendirilmektedir. Ayrıca bazı biyojen aminler nitrit varlığında muhtemel kanserojen maddeler olan nitrozaminleri oluştururken, bazıları

ise yüksek miktarlarda alındığında sitotoksik etkiye sahiptirler. Canlılarda önemli fizyolojik roller üstlenen biyojen aminler, gıdalarla alım söz konusu olduğunda ciddi sağlık riskleri ile ilişkilendirildiği için, tüketici sağlığı açısından çok dikkatli olunması gereken bir konudur.

KAYNAKLAR

- Agüero, N. D. L., Frizzo, L. S., Ouwehand, A. C., Aleu, G., & Rosmini, M. R. (2020). Technological characterisation of probiotic lactic acid bacteria as starter cultures for dry fermented sausages. *Foods*, 9(5), 596.
- Ahmada, W., Mohammeda, G.I., Al-Eryania, D.A., Saigla, Z.M., Alyoubia, A.O., Alwaela, H., Bashammakha, A.S., O'Sullivan, C.K., El-Shahaw M.S. (2020). Biogenic Amines Formation Mechanism and Determination Strategies: Future Challenges and Limitations. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 50(6), 485-500. <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1657793>.
- Akan, A., Demirağ, M. K. (2018). Gıdalarda biyojen amin oluşum mekanizmalarına etki eden faktörler ve biyojen aminlerin diğer bileşiklere dönüşümleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24 (7): 1388-1392. Doi: 10.5505/pajes.2017.90022.
- Al Bulushi, I., Poole, S., Deeth, H.C., Dykes, G.A. (2009). Biogenic amines in fish: Roles in intoxication, spoilage, and nitrosamine formation-A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(4), 369-77. doi: 10.1080/10408390802067514
- Almeida, C., Fernandes, J. O., Cunha, S. C. (2012). A novel dispersive liquid-liquid microextraction (DLLME) gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) method for the determination of eighteen biogenic amines in beer. *Food Control*, 25(1): 380-388. Doi: 10.1016/j.foodcont.2011.10.052.
- Alvarez, M. A., Moreno-Arribas, M. V. (2014). The problem of biogenic amines in fermented foods and the use of potential biogenic amine-degrading microorganisms as a solution. *Trends in Food Science & Technology*, 39(2): 146-155.
- Andic, S., Genccelep, H., Kose, S. (2010). Determination of biogenic amines in herby cheese. *International Journal of Food Properties*, 13(6): 1300-1314. Doi: 10.1080/10942910903061869.
- Arena, M.E., Manca De Nadra, M.C. (2001). Biogenic amine production by *Lactobacillus*, *Journal of Applied Microbiology*, 902, 158-162. doi: 10.1046/j.1365-2672.2001.01223.x.
- Atakisi, E., Merhan, O. (2017). Nitric oxide synthase and nitric oxide involvement in different toxicities. In S.S.S. Saravi (Ed.), *Nitric Oxide Synthase Simple Enzyme-Complex Roles*. (pp. 197-214), Croatia, InTech. doi: 10.5772/intechopen.68494
- Barbieri, F., Montanari, C., Gardini, F., Tabanelli, G. (2019). Biogenic amine production by lactic acid bacteria: A review. *Foods*, 8 (1): 17. Doi: 10.3390/foods8010017.
- Bardócz, S. (1995). Polyamines in food and their consequences for food quality and human health. *Trends in Food Science and Technology*, 6(10), 341-346. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(00\)89169-4](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(00)89169-4)

- Basheer, C., Wong, W., Makahleh, A., Tameem, A. A., Salhin, A., Saad, B., & Lee, H. K. (2011). Hydrazone-based ligands for micro-solid phase extraction-high performance liquid chromatographic determination of biogenic amines in orange juice. *Journal of chromatography A*, 1218 (28): 4332-4339.
- Blackwell, B., Mabbitt, L.A. (1965). Tyramine in cheese related to hypertensive crises after monoamine oxidase inhibition. *The Lancet*, 285(7392), 938-940. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(65\)91257-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(65)91257-2)
- Benkerroum, N. (2016). Biogenic Amines in Dairy Products: Origin, Incidence, and Control Means. *Comprehensive Reviewes in Food Science and Food Safety*, 15(4), 801-826. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12212>
- Biji, K.B., Ravishankar, C.N., Venkateswarlu, R., Mohan, C.O., Gopal, T.K.S. (2016). Biogenic amines in seafood: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 2210-2218. doi: 10.1007/s13197-016-2224-x.
- Bonczar, G., Filipczak-Fiutak, M., Pluta-Kubica, A., Duda, I., Walczycka, M., Staruch, L. (2018). The range of protein hydrolysis and biogenic amines content in selected acid-and rennet-curd cheeses. *Chemical Papers*, 72(10): 2599-2606. Doi: 10.1007/s11696-018-0490-y.
- Bover-Cid, S., Holzapfel, W. H. (1999). Improved screening procedure for biogenic amine production by lactic acid bacteria. *International Journal of Food Microbiology*, 53 (1): 33-41. Doi: [doi.org/10.1016/S0168-1605\(99\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(99)00152-X).
- Bover-Cid, S., Hugas, M., Izquierdo-Pulido, M., & Vidal-Carou, M. C. (2001). Amino acid-decarboxylase activity of bacteria isolated from fermented pork sausages. *International Journal of Food Microbiology*, 66(3): 185-189. Doi: 10.1016/S0168-1605(00)00526-2.
- Büyük, S., Marangoz, B. (2018). Peynirlerde Biyojen Aminler. *Aydın Gastro-nomy*, 2 (2): 35-44.
- Câmara, S. P. A., Dapkevicius, A., Silva, C. C. G., Malcata, F. X., LN Enes Dapkevicius, M. (2020). Artisanal Pico cheese as reservoir of Enterococcus species possessing virulence and antibiotic resistance properties: Implications for food safety. *Food Biotechnology*, 34 (1): 25-41. Doi: 10.1080/08905436.2019.1710844.
- Chattopadhyay, M.K., Tabor, C.W., Tabor, H. (2009). Polyamines are not required for aerobic growth of *Escherichia coli*: preparation of a strain with deletions in all of the genes for polyamine biosynthesis. *Journal of Bacteriology*, 191(17), 5549-5552. doi: 10.1128/JB.00381-09
- Chen, K. I., Li, B. R., Chen, Y. T. (2011). Silicon nanowire field-effect transistor-based biosensors for biomedical diagnosis and cellular recording investigation. *Nano Today*, 6 (2): 131-154. Doi: 10.1016/j.nantod.2011.02.001.
- Chu, C. H. and Bjeldanes, L. F. (1981). Effect of diamines, polyamines and tuna fish extracts on the binding of histamine to mucin *in vitro*. *Journal*

- of Food Science, 47(1), 79-80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb11031.x>
- Cohen, S.S. (1998). A Guide to the Polyamines. pp. 555, New York: Oxford University Press.
- Conca, R., Bruzzoniti, M.C., Mentasti, E., Sarzanini, C., Hajos, P. (2001). Ion chromatographic separation of polyamines: Putrescine, spermidine and spermine. *Analytica Chimica Acta*, 439, 107-114. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(01\)01022-4](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)01022-4)
- Costa, M. P., Rodrigues, B. L., Frasao, B. S., Conte-Junior, C. A. (2018). Biogenic amines as food quality index and chemical risk for human consumption. In: Food quality: Balancing health and disease (pp. 75-108). Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-811442-1.00002-X.
- Daniel, D., Dos Santos, V. B., Vidal, D. T. R., & do Lago, C. L. (2015). Determination of biogenic amines in beer and wine by capillary electrophoresis–tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1416: 121-128. Doi: 10.1016/j.chroma.2015.08.065.
- del Rio, B., Redruello, B., Linares, D.M., Ladero, V., Ruas-Madiedo, P., Fernandez, M., Martin, M.C., Alvarez, M.A. (2019). The biogenic amines putrescine and cadaverine show *in vitro* cytotoxicity at concentrations that can be found in foods. *Scientific Reports*, 9,120. doi: 10.1038/s41598-018-36239-w.
- Diler, M., Akbağ, E., Işık, V., Günay, E. A., Erkeyacan, H., Güneşer, O., Yüceer, Y. K. (2018). Isıl İşlem ve Olgunlaştırma Sürelerinin Ezine Peynirinde Biyojen Amin Oluşumuna Etkileri. *Gıda*, 43(4): 687-701. Doi: 10.15237/gida.GD18043.
- Drabik-Markiewicz, G., Dejaegher, B., De Mey, E., Kowalska, T., Paelinck, H., Vander Heyden, Y. (2011). Influence of putrescine, cadaverine, spermidine or spermine on the formation of *N*-nitrosamine in heated cured pork meat. *Food Chemistry*, 126(4), 1539-1545. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.149>
- Doeun, D., Davaatseren, M., Chung., M.S., (2017). Biogenic amines in foods. *Food Science and Biotechnology*, 26(6):1463–1474. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0239-3>
- Düz, M., Fidan, A.F. (2016). Biyojen Amniler ve Etkileri. *Kocatepe Veterinary Journal*, 9(2), 114-121.
- EFSA. (2011). Scientific Opinion on risk based control of biogenic amine formation in fermented foods. *EFSA Journal*, 9(10), 2393.
- Emborg, J., Dalgaard, P. (2006). Formation of histamine and biogenic amines in cold-smoked tuna: an investigation of psychrotolerant bacteria from samples implicated in cases of histamine fish poisoning. *Journal of Food Protection*, 69(4):897-906. doi: 10.4315/0362-028x-69.4.897.

- Erdag, D., Merhan, O., Yildiz, B. (2019). Biochemical and Pharmacological Properties of Biogenic Amines. In book: Biogenic Amines. (pp. 1-14), IntechOpen, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81569>
- EU Commission Regulation EC No 2073/2005, Microbiological criteria for foodstuffs, OJ. L 338, pp. 126.
- Feng, X., Ashley, J., Zhou, T., Halder, A., Sun, Y. (2018). A facile molecularly imprinted polymer-based fluorometric assay for detection of histamine. RSC Advances, 8 (5): 2365-2372. Doi: 10.1039/c7ra11507e.
- Fukuchi, J., Kashiwagi, K., Yamagishi, M., Ishihama, A., Igarashi, K. (1995). Decrease in cell viability due to the accumulation of spermidine in spermidine acetyltransferase-deficient mutant of Escherichia coli. Journal of Biological Chemistry, 270(32), 18831-18835. doi: 10.1074/jbc.270.32.18831
- Fiocco, D., Pardo, I., Palermo, C., Massa, S., Spano. (2007). Biogenic Amine Formation in Fermented Beverages: Targets, Tools and Triumphs. Food, 1(1), 49-55.
- Friestad, G.K. (2014). Control of Asymmetry in the Radical Addition Approach to Chiral Amine Synthesis. In W. Li, X. Zhang (Eds.), Stereoselective Formation of Amines. (pp. 1-33), London: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-53929-9
- García-Moruno, E., Carrascosa, A. V., Muñoz, R. (2005). A rapid and inexpensive method for the determination of biogenic amines from bacterial cultures by thin-layer chromatography. Journal of Food Protection, 68(3): 625-629. Doi: 10.4315/0362-028X-68.3.625.
- Gasarasi, G., Kelgtermans, M., Van Roy, K.J., Delvaux, F.R., Derdelinckx, G. (2003). Occurrence of biogenic amines in beer: Causes and proposals of remedies. Monatsschrift für Brauwissenschaft, 56(2-3), 58-63.
- Gençcelep, H., Kaban, G., Aksu, M. I., Öz, F., Kaya, M. (2008). Determination of biogenic amines in sucuk. Food Control, 19 (9): 868-872. Doi: 10.1016/j.foodcont.2007.08.013.
- Gonzaga, V.E., Lescano, A.G., Huaman, A.A., Salmon-Mulanovich, G., Blazes, D.L. (2009). Histamine levels in fish from markets in Lima, Peru. Journal of Food Protection, 72(5), 1112–1115. doi: 10.4315/0362-028x-72.5.1112
- Göncü, B., Akın, M. S., Akın, M. B. (2017). Peynirde biyojen amin varlığı ve tespit edilme yöntemleri. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 21 (1): 126-132. Doi : 10.29050/harranziraat.303223.
- Halasz, A., Barath, A., Simon-Sarkadi, L., Holzapfel, W. (1994) Biogenic amines and their production by microorganisms in food. Trends Food Science and Technology, 5(2), 42-49. [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(94\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0924-2244(94)90070-1)
- He, L., Xu, Z., Hirokawa, T., Shen, L. (2017). Simultaneous determination of aliphatic, aromatic and heterocyclic biogenic amines without derivatization by capillary electrophoresis and application in beer analysis. Jour-

- nal of Chromatography A, 1482, 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2016.12.067>
- He, Y., Kashiwagi, K., Fukuchi., J., Terao, K., Shirahata, A., Igarashi, K. (1993). Correlation between the inhibition of cell growth by accumulated polyamines and the decrease of magnesium and ATP. *European Journal of Biochemistry*, 217(1), 89-96. doi: 10.1111/j.1432-1033.1993.tb18222.x.
- Hernandez-Jover, T., Izquierdo-Pulido, M., Veciana-Nogues, M.T., Marine-Font, A., Vidal-Carou, M.C. (1997). Biogenic amine and polyamine contents in meat and meat products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45(6), 2098-2102. <https://doi.org/10.1021/jf960790p>
- Hidalgo, F.J., Navarro, J.L., Delgado, R.M., Zamora, R. (2013). Histamine formation by lipid oxidation products. *Food Research International*, 52(1), 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.03.031>
- Hidalgo, F.J., Zamora R. (2019). Formation of phenylacetic acid and benzaldehyde by degradation of phenylalanine in the presence of lipid hydroperoxides: New routes in the amino acid degradation pathways initiated by lipid oxidation products. *Food Chemistry: X*, 2, 100037. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2019.100037>
- Hidalgo, F.J., Zamora, R. (2016). Amino Acid Degradations Produced by Lipid Oxidation Products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56, 1242-1252. doi: 10.1080/10408398.2012.761173
- Joosten HMLJ, 1988. The biogenic amine contents of Dutch cheese and their toxicological significance. *Neth. Milk Dairy J.* 42, 25-42.
- Kaçar, C., Dalkıran, B. (2020). Amin Fonksiyonlu Karbon Nanotüp, Kalay Oksit Nanopartikül ve Diamin Oksidaz Temelli Triptamin Biyosensörü. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1): 631-641.
- Kahraman, S. B. (2012). Akrilamid ve biyojenik aminler için gıda örneklerine yönelik kapiler elektroforetik analiz yöntemlerinin geliştirilmesi (Doktora tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kalac, P. (2009). Recent advances in the research on biological roles of dietary polyamines in man. *Journal of Applied Biomedicine*, 7(2), 65-74. doi: 10.32725/jab.2009.007
- Kalac, P. (2014). Health effects and occurrence of dietary polyamines: A review for the period 2005-mid 2013. *Food Chemistry*, 161, 27-39. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.03.102.
- Kalac, P., Spicka, J., Krizek, M., Steidlova S., Pelikanova, T. (1999). Concentrations of seven biogenic amines in sauerkraut, *Food Chemistry* 67(3), 275-280. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00131-4)
- Kankaya, D. A., Tuncer, B. Ö., Tuncer, Y. (2017). Gıda Kaynaklı Enterokokların Potansiyel Risk Faktörleri. *Gıda*, 42 (1): 8-19. Doi: 10.15237/gida.

- GD16048. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 48(1), 455-463. doi: 10.1167/iovs.06-0379
- Kaneko, S., Ueda-Yamada, M., Ando, A., Matsumura, S., Okuda-Ashitaka, E., Matsumura, M., Uyama, M., Ito, S. (2007). Cytotoxic effect of spermine on retinal pigment epithelial cells.
- Karahan, A. G. (2003). Gıdalarda Biyojen Aminler. Orlab On-Line Mikrobiyoloji Dergisi, 1 (5): 21-32.
- Kashiwagi, K., Shibuya, S., Tomitori, H., Kuraishi, A., Igarashi, K. (1997). Excretion and Uptake of Putrescine by the PotE Protein in *Escherichia coli*. The Journal of Biological Chemistry, 272(10), 6318-6323
- Kim, M.K., Mah, J.H., Hwang, H.J. (2009). Biogenic amine formation and bacterial contribution in fish, squid and shellfish. Food Chemistry 116(1), 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.02.010>.
- Koçar, D., Köse, S., Tufan, B., Ščavničar, A., & Pompe, M. (2021). Determination of biogenic amines in fresh fish and processed fish products using IC-MS/MS. Foods, 10 (8): 1746.
- Konakovsky, V., Focke, M., Hoffmann-Sommergruber, K., Schmid, R., Scheiner, O., Moser, P., ... & Hemmer, W. (2011). Levels of histamine and other biogenic amines in high-quality red wines. Food Additives and Contaminants, 28 (4): 408-416. Doi: 10.1080/19440049.2010.551421.
- Köse, S., Koral, S., Tufan, B., Pompe, M., Scavničar, A., Koçar, D. (2012). Biogenic amine contents of commercially processed traditional fish products originating from European countries and Turkey. European Food Research and Technology, 235 (4): 669-683.
- Kučerová, K., SvobodaVá, H., Tůma, Š., Ondráčková, I., Plockova, M. (2009). Production of biogenic amines by enterococci. Czech Journal of Food Sciences, 27 (Special Issue 2): 50-55.
- Ladero, V., Calles-Enríquez, M., Fernández, M., Alvarez, M.A. (2010). Toxicological effects of dietary biogenic amines. Current Nutrition & Food Science, 6:145–156. doi: 10.2174/157340110791233256.
- Landete, J. M., de Las Rivas, B., Marcobal, A., Muñoz, R. (2007). Molecular methods for the detection of biogenic amine-producing bacteria on foods. International Journal of Food Microbiology, 117 (3): 258-269. Doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2007.05.001.
- Lapa-Guimaraes, J., Pickova, J. (2004). New solvent systems for thin-layer chromatographic determination of nine biogenic amines in fish and squid. Journal of Chromatography A, 1045 (1-2): 223-232. Doi: 10.1016/j.chroma.2004.06.014.
- Lázaro de la Torre, C. A., Conte-Júnior, C. A. (2013). Chromatographic methods for biogenic amines determination in foods of animal origin. Brazilian

- Journal of Veterinary Research and Animal Science, 50 (6): 430-446. Doi: 10.11606/issn.1678-4456.v50i6p430-446.
- Leszczycha, M., Pytasz, U. (2004). The histamine content in some samples of food products. Czech Journal of Food Sciences, 22(3), 81. Doi: 10.17221/3410-CJFS.
- Linares, D.M., Martin, M.C., Ladero, V., Alvarez, M.A., Fernandez, M. (2011). Biogenic Amines in Dairy Products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 51:691-703. doi: 10.1080/10408398.2011.582813
- Løvaas, E., (1991). Antioxidative effects of polyamines. JAOCS, 68(6), 353-358. <https://doi.org/10.1007/BF02663749>
- Lucas, P.M., Blancato, V.S., Claisse, O., Magni, C., Lolkema, J.S., Lonvaud-Funel, A. (2007). Agmatine deiminase pathway genes in *Lactobacillus brevis* are linked to the tyrosine decarboxylation operon in a putative acid resistance locus, Microbiology, 153, 2221-2230. doi: 10.1099/mic.0.2007/006320-0.
- Lüthy, J., Schlatter, C.(1983). Biogene amine in lebensmitteln: Zur wirkung von histamine, tyramin und phenylethylamin auf den Menschen. Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung, 177, 439-443. doi: 10.1007/BF01409672
- Majjala, R., Eerola, S., Lievonen, S., Hill, P., Timo Hirvi, T. (1995). Formation of Biogenic Amines during Ripening of Dry Sausages as Affected by Starter Culture and Thawing Time of Raw Materials. Journal of Food Science, 60(6), 1187-1190. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb04552.x>
- Marcobal, A., de las Rivas, B., Moreno-Arribas, M.V., Munoz, R. (2004). Identification of the ornithine decarboxylase gene in the putrescine producer *Oenococcus oeni* BIFI-83. FEMS Microbiology Letters, 239(2), 213-220. doi: 10.1016/j.femsle.2004.08.036.
- Mete, A., Coşansu, S., Demirkol, O., Ayhan, K. (2017). Amino acid decarboxylase activities and biogenic amine formation abilities of lactic acid bacteria isolated from shalgam. International Journal of Food Properties, 20(1): 171-178. Doi: 10.1080/10942912.2016.1152479.
- Millichap, J. G., Yee, M. M. (2003). The diet factor in pediatric and adolescent migraine. Pediatric Neurology, 28(1), 9-15. doi: 10.1016/s0887-8994(02)00466-6.
- Mohammed, G. I., Bashammakh, A. S., Alsibai, A. A., Alwael, H., & El-Shahawi, M. S. (2016). A critical overview on the chemistry, clean-up and recent advances in analysis of biogenic amines in foodstuffs. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 78: 84-94. Doi: 10.1016/j.trac.2016.02.007.
- Moret, S., Conte, L. S. (1996). High-performance liquid chromatographic evaluation of biogenic amines in foods an analysis of different methods of sample preparation in relation to food characteristics. Journal of Chromatography A, 729 (1-2): 363-369. Doi: 10.1016/0021-9673(95)00961-2.

- Munzi, G., Failla, S., Di Bell, S. (2021). Highly selective and sensitive colorimetric/fluorometric dual mode detection of relevant biogenic amines. *Analyst*, 146(7), 2021,2144-2151. <https://doi.org/10.1039/D0AN02336A>
- Murray, C. K., Hobbs, G., Gilbert, R. G. (1982). Scombrototoxin and scombrototoxin-like poisoning from canned fish. *Journal of Hygiene*, 88(2), 215-218. doi: 10.1017/s002217240007008x
- Naila, A., Flint, S., Fletcher, G., Bremer, P., Meerdink, G. (2010). Control of Biogenic Amines in Food-Existing and Emerging Approaches. *Journal of Food Science*, 75(7), 139-150. doi: 10.1111/j.1750-3841.2010.01774.x
- Nalazek-Rudnicka, K., Kubica, P., Wasik, A. (2020). Discrepancies in determination of biogenic amines in beer samples by reversed phase and hydrophilic interaction liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 159: 105574. Doi: 10.1016/j.micro.2020.105574.
- Oguri, S. (2000). Electromigration methods for amino acids, biogenic amines and aromatic amines. *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications*, 747 (1-2): 1-19.
- Oğuzhan-Yıldız, P., Kırım, B. (2015). Balık ve balık ürünlerinde biyogen aminlerin varlığı. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 12(1), 139-145.
- Oracz, J., Nebesny, E. (2014). Influence of roasting conditions on the biogenic amine content in cocoa beans of different Theobroma cacao cultivars. *Food Research International*, 55:1-10. Doi: 10.1016/j.foodres.2013.10.032.
- Ordóñez, A.I., Ibanez, F.C., Torre, P., Barcina, Y. (1997). Formation of biogenic amines in Idiazabal ewe's-milk cheese: Effect of ripening, pasteurization, and starter. *Journal of Food Protection*, 60(11), 1371-1375. doi: 10.4315/0362-028X-60.11.1371.
- Ordóñez, J. L., Troncoso, A. M., García-Parrilla, M. D. C., Callejón, R. M. (2016). Recent trends in the determination of biogenic amines in fermented beverages—A review. *Analytica Chimica Acta*, 939: 10-25. Doi: 10.1016/j.aca.2016.07.045.
- Önal, A. (2007). A review: Current analytical methods for the determination of biogenic amines in foods. *Food Chemistry*, 103(4): 1475-1486. Doi: 10.1016/j.foodchem.2006.08.028.
- Örs-Gevrekci, A., (2017). The roles of polyamines in microorganisms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33, 204. doi: 10.1007/s11274-017-2370-y
- Özdestan, Ö., Üren, A. (2006). Biyogen amin analiz yöntemleri. *Akademik Gıda*, 4 (2): 19-24.

- Özdestan, Ö. (2009). Türkiyede üretilen bazı fermente gıdalarda biyojen aminlerin belirlenmesi üzerine bir çalışma (Doktora tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Özdestan, Ö., Üren, A. (2010). Biogenic amine content of kefir: a fermented dairy product. *European Food Research and Technology*, 231(1): 101-107.
- Özdestan, Ö., Güngör, F. Ö., Alpözen, E., Güven, G., Üren, A. (2011). Farklı yörelerde yetiştirilen Gemlik zeytinlerinden elde edilen sofralık siyah zeytinlerin biyojen aminlerinin belirlenmesi. *Zeytin Bilimi*, 2 (1): 13-20.
- Özogul, Y., Özogul, F. (2019). Biogenic Amines Formation, Toxicity, Regulations in Food, In B. Saad, R. Tofalo (Eds.), *Biogenic Amines in Food: Analysis, Occurrence and Toxicity*. (pp. 1-17), Royal Society of Chemistry. doi: 10.1039/9781788015813-00001
- Papageorgiou, M., Lambropoulou, D., Morrison, C., Kłodzińska, E., Namieśnik, J., Plotka-Wasyłka, J. (2017). Literature update of analytical methods for biogenic amines determination in food and beverages. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 98: 128-142. Doi: 10.1016/j.trac.2017.11.001.
- Pegg, A.E. (2013). Toxicity of polyamines and their metabolic products. *Chemical Research in Toxicology*, 26(12), 1782-1800. <https://doi.org/10.1021/tx400316s>
- Pegg, A.E. (1982). Polyamine metabolism and function. *American Journal of Physiology*, 243(5), C212-221. doi: 10.1152/ajpcell.1982.243.5.C212.
- Perley, J.E., Stowe, B.B. (1966). The Production of Tryptamine from Tryptophan by *Bacillus cereus* (KVT). *Biochemical Journal*, 100, 169-174.
- Pessione, E., Pessione, A., Lamberti, L., Coisson, D.J., Riedel, K., 3, Mazzoli, R., 1, Bonetta, S., Eberl, L., Giunta, C. (2009). First evidence of a membrane-bound, tyramine and b-phenylethylamine producing, tyrosine decarboxylase in *Enterococcus faecalis*: A two-dimensional electrophoresis proteomic study. *Proteomics*, 9, 2695-2710. doi: 10.1002/pmic.200800780.
- Pineda, A., Carrasco, J., Peña-Farfal, C., Henríquez-Aedo, K., Aranda, M. (2012). Preliminary evaluation of biogenic amines content in Chilean young varietal wines by HPLC. *Food Control*, 23 (1): 251-257.
- Premont, R. T., Gainetdinov, R.R. Caron, M.G. (2001). Following the trace of elusive amines. *PNAS*, 98(17), 9474-9475. <https://doi.org/10.1073/pnas.1813561>
- Rao, T.S.S., Yeragani, V.K. (2009). Hypertensive crisis and cheese. *Indian Journal of Psychiatry*, 51(1), 65-66. doi: 10.4103/0019-5545.44910
- Reitzer, L., (2014). Amino Acid Synthesis. Reference Module in Biomedical Sciences. Reference Module in Biomedical Sciences, pp. 1-17, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.02427-2>

- Ruiz-Capillas, C., Jiménez-Colmenero, F. (2004). Biogenic amines in meat and meat products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(7), 489-499. doi: 10.1080/10408690490489341.
- Ruiz-Capillas, C., Herrero, A.M. (2019). Impact of Biogenic Amines on Food Quality and Safety. *Foods*, 8, 62, doi:10.3390/foods8020062
- Romano, A., Klebanowski, H., La Guerche, S., Beneduce, L., Spano, G., Murat, M. L., & Lucas, P. (2012). Determination of biogenic amines in wine by thin-layer chromatography/densitometry. *Food Chemistry*, 135 (3): 1392-1396. Doi: 10.1016/j.foodchem.2012.06.022.
- Romano, R., Trip, H., Lolkema, J.S., Lucasc, P.M. (2013). Three-Component Lysine/Ornithine Decarboxylation System in *Lactobacillus saerimneri*. *Journal of Bacteriology*, 195(6), 249-1254.
- San Mauro Martin, I., Brachero, S., Garicano Vilar, E. (2016). Histamine intolerance and dietary management: A complete review. *Allergologia et Immunopathologia*, 44(5), 475-483. doi: 10.1016/j.aller.2016.04.015
- Simon-Sarkadi, L., Gelencser, E., Vida, A. (2003). Immunoassay method for detection of histamine in foods. *Acta Alimentaria*, 32(1), 89-93. Doi: 10.1556/aalim.32.2003.1.10
- Simon-Sarkadi, L. S. (2017). Biogenic amines in fermented foods and health implications. In: *Fermented foods in health and disease prevention* (pp. 625-651). Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-802309-9.00027-3.
- Simon-Sarkadi, L. S. (2019). Amino acids and biogenic amines as food quality factors. *Pure and Applied Chemistry*, 91(2): 289-300. Doi: 10.1515/pac-2018-0709.
- Schneider, B.L., Hernandez, V.J., Reitzer, L. (2013). Putrescine catabolism is a metabolic response to several stresses in *Escherichia coli*. *Molecular Microbiology*, 88(3), 537-550. <https://doi.org/10.1111/mmi.12207>
- Shalaby, A.R. (1996). Significance of biogenic amines to food safety and human health. *Food Research International*, 29(7), 675-690. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(96\)00066-X](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(96)00066-X)
- Shalaby, A. R. (1999). Simple, rapid and valid thin layer chromatographic method for determining biogenic amines in foods. *Food Chemistry*, 65 (1): 117-121. Doi: 10.1016/S0308-8146(98)00113-7.
- Shakila, R. J., Vasundhara, T. S., Kumudavally, K. V. (2001). A comparison of the TLC-densitometry and HPLC method for the determination of biogenic amines in fish and fishery products. *Food Chemistry*, 75(2): 255-259. Doi: 10.1016/s0308-8146(01)00173-x.
- Sherma, J. (2000). Thin-layer chromatography in food and agricultural analysis. *Journal of Chromatography A*, 880(1-2): 129-147. Doi: 10.1016/S0021-9673(99)01132-2.

- Silla Santos, M.H. (1996). Biogenic amines: their importance in foods. *International Journal of Food Microbiology*, 29, 213-231.
- Spano, G., Russo, P., Lonvaud-Funel, A., Lucas, P., Alexandre, H., Grandvalet, C., ... & Lolkema, J. S. (2010). Biogenic amines in fermented foods. *European Journal of Clinical Nutrition*, 64(3): S95-S100. Doi: 10.1038/ejcn.2010.218.
- Stratton, J.E., Hutkins, R.W., Taylor, S.L. (1991). Biogenic amines in cheese and other fermented foods: a review. *Journal of Food Protection*, 54(6):460-470. doi: 10.4315/0362-028X-54.6.460.
- Sumner, S. S., Taylor, S. L. (1989). Detection method for histamine-producing, dairy-related bacteria using diamine oxidase and leucocystal violet. *Journal of Food Protection*, 52(2), 105-108. Doi: doi.org/10.4315/0362-028X-52.2.105.
- Şanlı, T., Şenel, E. (2015). Formation of biogenic amines in cheese. In: *Processing and Impact on Active Components in Food* (pp. 223-230). Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-404699-3.00027-5.
- Tabor, C.W., Tabor, H. (1985). Polyamines in microorganisms. *Microbiological Reviews*, 49(1), 81-99. doi: 10.1128/mr.49.1.81-99.1985.
- Tabor, C.W., Tabor, H. (1984). Polyamines. *Annual Reviews of Biochemistry*, 53, 749-790. <https://doi.org/10.1146/annurev.bi.53.070184.003533>
- Taylor, S. L. (1986). Histamine food poisoning: Toxicology and clinical aspects. *Critical Reviews in Toxicology*, 17(2), 91-128. doi: 10.3109/10408448609023767.
- ten Brink, B., Damink, C., Joosten H.M.L.J., Huis in't Veld, J.H.J. (1990) Occurrence and formation of biologically active amines in foods. *International Journal of Food Microbiology*, 11(1), 73-84. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(90\)90040-C](https://doi.org/10.1016/0168-1605(90)90040-C)
- Til, H.P., Falke, H.E., Prinsen, M.K., Willems, M.I. (1997). Acute and subacute toxicity of tyramine, spermidine, spermine, putrescine and cadaverine in rats. *Food and Chemical Toxicology*, 35(3-4), 337-348. doi: 10.1016/s0278-6915(97)00121-x.
- Tricker, A.R., Preussmann, R. (1991). Carcinogenic N-nitrosamines in the diet: occurrence, formation, mechanisms and carcinogenic potential. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 259(3-4), 277-289. [https://doi.org/10.1016/0165-1218\(91\)90123-4](https://doi.org/10.1016/0165-1218(91)90123-4)
- Vasconcelos, H., Coelho, L. C., Matias, A., Saraiva, C., Jorge, P. A., de Almeida, J. M. (2021). Biosensors for biogenic amines: A review. *Biosensors*, 11(3): 82. Doi: 10.3390/bios11030082.
- Whitaker, J.R. (1996). *Enzymes*, In O. R. Fennema (Ed.), *Food Chemistry*. (3rd ed., pp. 431-531), New York: Marcel Dekker Inc.

- Williams-Ashman, H.G., Coppoc, G.L., Weber, G. (1972). Imbalance in Ornithine Metabolism in Hepatomas of Different Growth Rates as Expressed in Formation of Putrescine, Spermidine, and Spermine. *Cancer Research*, 32, 1924-1932.
- Wojnowski, W., Namieśnik, J., Płotka-Wasyłka, J. (2019). Dispersive liquid-liquid microextraction combined with gas chromatography–mass spectrometry for in situ determination of biogenic amines in meat: Estimation of meat’s freshness. *Microchemical Journal*, 145: 130-138. Doi: 10.1016/j.microc.2018.10.034.
- Yongmei, L., Xiaohong, C., Mei, J., Xin, L., Rahman, N., Mingsheng, D., Yan, G. (2009). Biogenic amines in Chinese soy sauce. *Food Control* 20(6), 593-597. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.08.020>
- Yücel, U., Üren, A. (2008). Biogenic amines in Turkish type pickled cabbage: effects of salt and citric acid concentration. *Acta Alimentaria*, 37 (1): 115-122. Doi : 10.1556/aalim.2007.0022.
- Zamora, R., Delgado, R.M., Hidalgo, F.J. (2012). Formation of β -phenylethylamine as a consequence of lipid oxidation. *Food Research International*, 46(1), 321-325. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.12.029>.
- Zeng, L., Xu, X., Guo, L., Wang, Z., Ding, H., Song, S., ... & Xu, C. (2021). An immunochromatographic sensor for ultrasensitive and direct detection of histamine in fish. *Journal of hazardous materials*, 419, 126533. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126533.
- Zhai, H., Yang, X., Li, L., Xia, G., Cen, J., Huang, H., & Hao, S. (2012). Biogenic amines in commercial fish and fish products sold in southern China. *Food Control*, 25(1): 303-308.