

MÜHENDİSLİK

ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

Haziran 2023

EDİTÖRLER

PROF. DR. COŞKUN ÖZALP

DOÇ. DR. SELAHATTİN BARDAK

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

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

Birinci Basım / First Edition • © Haziran 2023

ISBN • 978-625-6450-45-5

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.serüvenyayınevi.com

e-mail: serüvenyayınevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

MÜHENDİSLİK

ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

Haziran 2023

Editörler

PROF. DR. COŞKUN ÖZALP

DOÇ. DR. SELAHATTİN BARDAK

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

GIDA VE TARIMSAL ÜRÜNLERİN KALİTE KONTROLÜNDE YENİ TEKNOLOJİLER: VIS-NIR SPEKTROSKOPİSİ VE DERİN ÖĞRENME <i>Yeliz DURGUN</i>	1
--	---

Bölüm 2

SÜPER İLETKEN KABLOLARIN UYGULAMA ALANLARI VE GÜNCEL GELİŞMELER <i>V. Tuna ŞABA, Zuhal OKTAY, Can COSKUN, Bahadır BİRECİKLİ</i>	17
---	----

Bölüm 3

YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIM KAPLAMALAR <i>Bekir GÜNEY, Mehmet Akif ERDEN</i>	31
---	----

Bölüm 4

YAPAY ZEKÂ İLE KALP HASTALIĞINA ETKİSİ OLAN RİSK FAKTÖRLERİNİN ANALİZ EDİLMESİ <i>Murat TOPALOĞLU</i>	59
---	----

Bölüm 5

MADENCİLİKTE BİYOTEKNOLOJİ UYGULAMALARI <i>Zehra ÇETİNKAYA, Oktay BAYAT</i>	83
--	----

Bölüm 6

EEG SİNYALLERİN TARİHÇESİNE KISA BİR GİRİŞ <i>Negin MELEK</i>	111
--	-----

Bölüm 7

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA TRİBOLOJİ <i>Arzu KEVEN, Canan CİMŞİT, Ali İhsan ENGÜR</i>	131
--	-----

Bölüm 8

GIDALARDA BULUNAN DOĞAL KORUYUCU SİSTEMLER <i>Arzu KAVAZ YÜKSEL</i>	147
--	-----

Bölüm 9

TEPKİ YÜZEY YÖNTEMİ KULLANILARAK ENİNE LAMİNASYONLU
SENKRON RELÜKTANS MOTOR OPTİMİZASYONU

Hasan ÇAMCI, Onur Özdal MENGİ, Serdal ARSLAN..... 165

Bölüm 10

ENZİMLER VE MİKROBİYEL ENZİM ÜRETİMİ

Seval ANDIÇ, Ayhan BAŞTÜRK..... 187

Bölüm 11

FLORESAN PROTEİNLERİN BİYOTEKNOLOJİDE KULLANIMI

Hülya KUDUĞ CEYLAN..... 211

Bölüm 12

MAGNETRON PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN SERAMİK
FİLMER

Mevra ASLAN ÇAKIR..... 231

Bölüm 13

KAPLAMA YÖNTEMLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

Burak TAŞ, Özgün UZ, Özge TÜZÜN ÖZMEN..... 257

Bölüm 14

HÜCRESEL İMALATTA PARÇA-MAKİNE GRUPLARININ
BELİRLENMESİNDE GUSTAFSON KESSEL VE BULANIK C
ORTALAMALAR YÖNTEMİNİN ETKİNLİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Murat ŞAHİN 275

Bölüm 15

PEM YAKIT HÜCRESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN KASKAT DA-DA
YÜKSELTEN TİP DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN PID PARAMETRELERİNİN
METASEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE OPTİMİZASYONU

Funda DEMİR, Batıkan Erdem DEMİR, Sude KART..... 293

Bölüm 16

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ARA SOĞUTUCU (INTERCOOLER)
ISIL PERFORMANSINI İYİLEŞTİRMeye YÖNELİK ÇALIŞMALARIN
DEĞERLENDİRMESİ

Galip KALTAKKIRAN..... 313

Bölüm 17

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN BİNALARDA KULLANIMI
ÜZERİNE TÜRKİYE'DE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Fatih Selim BAYRAKTAR, Ramazan KÖSE 335

Bölüm 18

MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ KULLANILARAK ELEKTRİKLİ
EV ALETLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Bengisu Şeyda KOP , Levent BAYINDIR, Işıl KARABEY AKSAKALLI 355

Bölüm 19

ZAMAN GECİKMESİ VE KESİR DERECELİ PI DENETLEYİCİ İÇEREN
JENERATÖR UYARMA KONTROL SİSTEMİNİN KARARLILIK
BÖLGELERİNİN HESAPLANMASI

Deniz KATIPOĞLU 373

Bölüm 20

GIDA ENDÜSTRİSİNDE MİKROBİYAL ENZİMLER

Ayhan BAŞTÜRK, Seval ANDIÇ 387

Bölüm 21

ULAŞTIRMA PLANLAMASINDA KUYRUK TEORİSİ İÇİN
ÜSTEL SERVİS ZAMANLI MODELLERİN ÖRNEK ÜZERİNDEN
KIYASLANMASI

Kemal Muhammet ERTEN 419

Bölüm 1

GIDA VE TARIMSAL ÜRÜNLERİN KALİTE KONTROLÜNDE YENİ TEKNOLOJİLER: VIS-NIR SPEKTROSKOPİSİ VE DERİN ÖĞRENME

Yeliz DURGUN¹



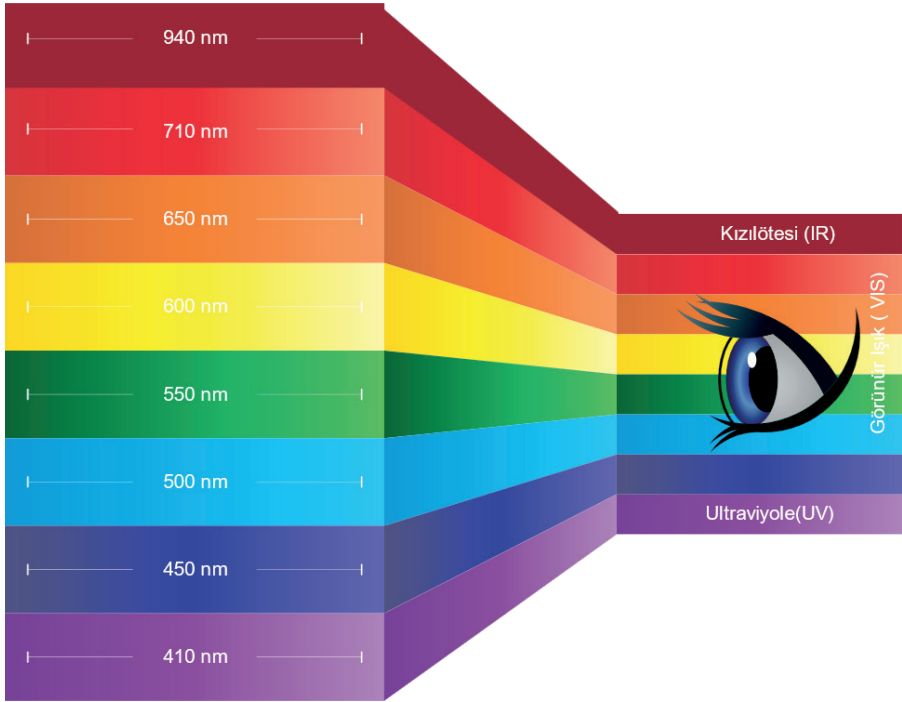
¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Turhal Meslek Yüksekokulu,
Elektronik ve Otomasyon Bölümü, yeliz.durgun@gop.edu.tr

1.GİRİŞ

Gıda ve tarımsal ürünlerin kalitesinin değerlendirilmesi, tüketicilerin sağlığı, gıda güvenliği ve sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından büyük öneme sahiptir. Geleneksel yöntemler, genellikle zaman alıcı, laboratuvar tabanlı ve yıkıcı özellikleri nedeniyle, sürekli ve gerçek zamanlı kalite izleme için uygun değildir. Bu nedenle, hızlı, hassas ve yıkıcı olmayan analitik yöntemlere olan talep artmaktadır. Görünür ve yakın kızılötesi (Vis-NIR) spektroskopisi, geniş bir yelpazede gıda ve tarımsal ürünlerin kalite parametrelerini değerlendirmek için kullanılan yıkıcı olmayan bir tekniktir. Vis-NIR spektroskopisi, ışığın farklı dalga boylarındaki yansıma, absorpsiyon ve iletim özelliklerini inceleyerek, gıda ve tarımsal ürünlerin iç ve dış özelliklerini analiz etmeyi sağlar. Bu yöntem, geleneksel laboratuvar analizlerine göre daha hızlı ve daha az iş gücü yoğun bir alternatif sunmaktadır. Bununla birlikte, Vis-NIR spektroskopisi verilerinin karmaşıklığı ve yüksek boyutluluğu, uygun veri analiz ve modelleme tekniklerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Son yıllarda, derin öğrenme yöntemleri, görüntü ve sinyal analizi, doğal dil işleme ve örüntü tanıma gibi çeşitli alanlarda başarılı uygulamalar göstermiştir. Derin öğrenme, özellikle karmaşık ve yüksek boyutlu veri kümelerinin analizinde etkili olmaktadır. Bu nedenle, Vis-NIR spektroskopisi verilerinin analizinde derin öğrenme yöntemlerinin kullanılması, gıda ve tarımsal ürünlerin kalite değerlendirmesinde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır.

Bu makale, Vis-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme yöntemlerine dayalı olarak gıda ve tarımsal ürünlerin kalite değerlendirmesini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma, Vis-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme yöntemlerinin kombinasyonunun avantajlarını ve uygulamalarını değerlendirecek, bu yöntemlerin gıda ve tarımsal ürün kalitesi değerlendirmesine nasıl katkıda bulunduğunu ve gelecekteki araştırmalar için potansiyel fırsatları ve zorlukları tartışılacaktır. Öncelikle, bu makalede Vis-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme yöntemlerinin temel prensipleri ve uygulama alanları anlatılacaktır. Bu kapsamda, Vis-NIR spektroskopisi tekniklerinin farklı tipleri, spektral veri işleme yöntemleri ve spektral özelliklerin çıkarılması incelenmektedir. Ayrıca, derin öğrenme algoritmalarının temel kavramları, mimarileri ve eğitim süreçleri de ele alınmaktadır. Daha sonra, Vis-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme yöntemlerinin gıda ve tarımsal ürün kalite değerlendirmesindeki uygulamalarına odaklanılmaktadır. Bu bağlamda, farklı gıda ve tarımsal ürünler üzerinde yapılan önceki çalışmaların sonuçları ve bulguları özetlenecek ve bu yöntemlerin başarısı değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra, Vis-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme yöntemlerinin gıda ve tarımsal ürünlerin kalite değerlendirmesinde karşılaştığı zorluklar ve sınırlamalar da incelenmektedir. Özellikle, spektral verilerin karmaşıklığı, özellik seçimi, derin öğrenme modelinin optimizasyonu ve genelleştirme

gibi konulara değinilmektedir. Bu kapsamda, bu yöntemlerin geliştirilmesi, veri toplama ve işleme tekniklerinin iyileştirilmesi ve yeni uygulama alanlarının keşfi gibi konular ele alınmaktadır. VIS (görünür) ve NIR (yakın kızılötesi) spektrumları, elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerini temsil etmektedir. Görünür spektrum, dalga boyları 400 ila 700 nanometre (nm) arasında olan elektromanyetik radyasyonu ifade etmektedir. İnsan gözü, bu dalga boyları arasındaki elektromanyetik radyasyonu algılayabilir ve renkler olarak tanımlamaktadır. Mavi, yeşil ve kırmızı ışınların birleşimi, beyaz ışığı oluşturmaktadır. Yakın kızılötesi spektrum, dalga boyları 700 ila 2500 nm arasında olan elektromanyetik radyasyonu ifade eder (Şekil 1). Bu bölge, görünür spektrumun ötesinde yer alır ve insan gözü tarafından algılanamaz. Bu spektrum, moleküllerin vibrasyonel durumlarını yansıtan farklı dalga boylarını içerir ve kimyasal bileşenleri analiz etmek için kullanılabilir. VIS-NIR spektrum analizi, bu iki spektrumun birleşimini kullanarak maddelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirleme yöntemidir. Bu analiz, özellikle gıda ve tarım ürünlerinde kullanılan yöntemler arasındadır ve nem, protein, yağ, şeker ve asit oranı gibi bileşenlerin hızlı ve doğru bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 1 VIS (görünür) ve NIR (yakın kızılötesi) spektrumları

VIS-NIR ölçümü yapan sensörler, elektromanyetik spektrumun görünür ve yakın kızılötesi bölgesindeki dalga boylarındaki ışığın yansımaları veya ge-

çişi ölçerek, örneğin gıda ve tarımsal ürünlerin kimyasal bileşenlerini belirleyen bir cihazdır. Bu sensörler, iki farklı tipte olabilir: tek nokta sensörler ve görüntüleme sensörleridir. Tek nokta sensörler, örneklenen maddenin belirli bir noktasındaki yansıma veya geçiş ışığını ölçmektedir. Görüntüleme sensörleri ise, örneklenen maddenin yüzeyini taramak için kullanılır ve örneklenen maddenin her bir noktasındaki yansıma veya geçiş ışığını ölçmektedir. Bu sensörlerin çalışma mantığı, örneklenen maddeden yansıyan veya geçen ışığın ölçülmesine dayanmaktadır. Örneklenen madde, ışığın dalga boyuna ve kimyasal bileşenine bağlı olarak farklı miktarlarda ışığı yansıtır veya geçirmektedir. Ölçüm yapılan sensörler, örneğin gıda veya tarımsal ürünün üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağından yayılan ışık örneğin örneklenen maddenin yüzeyine düşmektedir. Maddeden yansıyan veya geçen ışık, bir optik sistem yardımıyla sensöre iletir ve sensör, ışığın yoğunluğunu ölçer. Bu ölçümler, bir algoritma kullanılarak işlenir ve örneğin gıda veya tarımsal ürünün kimyasal bileşenlerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. VIS-NIR spektrum analizi için kullanılan sensörler, hızlı, doğru ve güvenilir sonuçlar sağlamaktadır. Bu nedenle, gıda ve tarım sektöründe, ürün kalitesinin değerlendirilmesi ve kontrolü için sıkça kullanılırlar. Derin öğrenme yöntemleri, büyük veri kümeleriyle çalışan yapay zeka modelleri kullanır ve özellikle görüntü işleme ve nesne tanıma gibi alanlarda oldukça başarılıdır. VIS-NIR spektrum analizi, derin öğrenme yöntemleriyle birleştirildiğinde, daha doğru sonuçlar elde etmek için kullanılabilir. Bu yaklaşım, özellikle gıda ve tarım sektöründe, büyük veri kümelerinin işlenmesi, kalite kontrolü ve tedarik zinciri yönetimi gibi alanlarda etkili bir araç olarak kabul edilmektedir. Bu makale, Vis-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme yöntemlerinin gıda ve tarımsal ürünlerin kalite değerlendirmesindeki potansiyelini vurgulamak ve bu alandaki araştırmaları teşvik etmek amacıyla hazırlanmıştır. Bu sayede, gıda güvenliği ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının desteklenmesine ve tüketicilerin sağlığına katkıda bulunulması hedeflenmektedir.

2.VIS-NIR SPEKTROSKOPİSİYLE KULLANILAN DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİ

VIS-NIR spektroskopisi ile elde edilen verilerin analizi için birçok farklı derin öğrenme yöntemi kullanılmaktadır. VIS-NIR spektroskopisi ile elde edilen veriler, genellikle malzemelerin ve bileşiklerin optik özelliklerini incelemek için kullanılır. Bu verilerin analizi, sınıflandırma ve regresyon gibi makine öğrenimi algoritmalarının uygulanması ile gerçekleştirilebilir. Lojistik regresyon (LR), destek vektör makinesi (SVM), evrişimli sinir ağı (CNN), tekrarlayan sinir ağı (RNN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) algoritmaları, VIS-NIR spektroskopisi verilerinin analizinde kullanılabilir. Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar şunlardır:

Yapay sinir ağları (ANN): Biyolojik sinir sistemlerinden esinlenerek oluşturulan ve öğrenme yeteneğine sahip olan derin öğrenme yöntemidir.

Bu yöntem, katmanlı bir yapıda düzenlenmiş bir dizi nörondan oluşur. Her nöron, ağırlıklar ve aktivasyon fonksiyonları gibi unsurlar kullanarak girdileri işler ve bir sonuç üretir. Bu nöronlar, verileri öğrenme ve tahmin etme amacıyla farklı katmanlar halinde organize edilir: giriş katmanı, bir veya birden fazla gizli katman ve çıkış katmanı.

Yapay sinir ağları, gıda ve tarım sektörlerindeki kalite kontrol süreçlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu uygulamalar, öncelikle ürün özelliklerinin tahmin edilmesi ve sınıflandırılması amacıyla gerçekleştirilir. Yapay sinir ağları, özellikle kalitesi, yapısal ve kimyasal bileşenleri hızlı ve doğru bir şekilde değerlendirmek için VIS-NIR spektroskopisi gibi spektroskopik tekniklerle birleştirilir.

Örnek uygulamalar şunları içerir:

- Süt ürünleri kalitesi: Yapay sinir ağları, süt ve süt ürünlerinin protein, yağ ve kalsiyum gibi bileşenlerinin konsantrasyonlarını tahmin etmek için kullanılabilir. Bu, sürecin hızlı ve doğru olduğu ve örneklerin tahribatına gerek olmadığı için önemlidir.
- Meyve ve sebzelerin olgunlaşma seviyesi: Yapay sinir ağları, meyve ve sebzelerin renk, şekil, boyut ve spektral özellikler gibi parametreleri kullanarak olgunlaşma seviyesini ve hasat zamanını belirlemeye yardımcı olabilir. Bu, ürünlerin optimum kalitede toplanmasını ve dağıtılmasını sağlar.
- Etin yağ içeriği ve kalitesi: Yapay sinir ağları, etin yağ içeriği, protein miktarı ve su aktivitesi gibi özelliklerini tahmin etmek için kullanılabilir. Bu, et kalitesinin değerlendirilmesi ve tüketicilere en iyi ürünlerin sunulması açısından önemlidir.

Yapay sinir ağları, esnekliği ve geniş uygulama yelpazesi nedeniyle tarım ve gıda endüstrisinde önemli bir araçtır. Bu modeller, çeşitli durumlarda doğru ve güvenilir tahminlerde bulunarak üretim süreçlerini optimize etmeye ve ürün kalitesini artırmaya yardımcı olur.

Evrışimli sinir ağları (CNN): özellikle görüntü işleme ve nesne tanıma gibi alanlarda başarılı olan derin öğrenme yöntemidir. CNN'ler, yerel özelliklerin korunmasına ve öğrenilmesine odaklanarak, geleneksel yapay sinir ağlarının aksine görüntülerin ve yapısal verilerin analizine daha uygundur. CNN'ler, evrişim katmanları, aktivasyon fonksiyonları ve havuzlama katmanları gibi bileşenler kullanarak girdi görüntüsünden özellikler çıkarır ve bu özelliklerin yüksek seviyeli gösterimlerini oluşturur.

Evrışim katmanları, görüntüdeki özelliklerin çıkarılmasında kilit rol oynar. Bu katmanlar, evrişim işlemi yoluyla görüntü üzerinde kaydırılan filtrelerden oluşur. Bu filtreler, kenarlar, doku ve renk gibi düşük seviyeli özellikleri yakalar ve sonraki katmanlara iletilir. Havuzlama katmanları, özellik

haritalarının boyutunu azaltarak hesaplama karmaşıklığını ve aşırı öğrenmeyi önler.

CNN'ler, gıda ve tarım sektörlerinde özellikle görüntü ve spektroskopik verilerin analizinde kullanılır. Uygulamalar şunları içerir:

- Meyve ve sebzelerin olgunluk seviyeleri: CNN'ler, meyve ve sebzelerin yüzey görüntülerini analiz ederek hasat edilmeden önce olgunluk seviyelerini belirlemeye yardımcı olabilir. Bu, doğru hasat zamanının belirlenmesini sağlayarak ürün kalitesini ve tüketici memnuniyetini artırır.

- Gıda kalitesi ve güvenliği: CNN'ler, gıda ürünlerinin yüzey görüntülerini ve VIS-NIR spektroskopik verilerini analiz ederek kalite ve güvenlik parametrelerini değerlendirebilir. Örnek olarak, bozulmuş meyve ve sebzelerin tespiti, et ürünlerinde yabancı madde varlığı ve mikroorganizmaların tespiti gibi uygulamalar bulunmaktadır.

- Bitki hastalıkları ve zararlı tespiti: CNN'ler, bitkilerin ve tarım alanlarının görüntülerini analiz ederek, bitki hastalıkları ve zararlıların belirlenmesi ve sınıflandırılmasında kullanılabilir. Bu, erken müdahale ve kontrol önlemlerinin alınmasını sağlayarak verim kayıplarının önlenmesine yardımcı olur.

Evrişimli sinir ağları, tarım ve gıda endüstrisinde görüntü ve spektroskopik verilerin analizinde hızlı ve güvenilir sonuçlar sunarak üretim süreçlerini ve ürün kalitesini geliştirmeye yardımcı olur. Bu modellerin geniş uygulama yelpazesi ve esnekliği, sektörün giderek daha fazla derin öğrenme tekniklerine yönelmesine neden olmaktadır.

Öğrenme Tabanlı Sınıflandırma (Learning-based Classification, LC) : Genel olarak, sınıflandırma görevleri için kullanılan bir derin öğrenme yaklaşımıdır. Bu yöntem, farklı derin öğrenme modelleri ve algoritmaları kullanarak, verilen veri kümesi içindeki örneklerin önceden tanımlanmış sınıflara atanmasını sağlar. LC, veri özelliklerinin otomatik olarak öğrenilmesine ve doğru sınıflandırma sonuçlarının elde edilmesine olanak tanır.

VIS-NIR spektrum analizi, gıda ve tarım alanlarında kalite kontrol ve ürün özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılır. Bu spektral verilerin işlenmesi ve sınıflandırılması için öğrenme tabanlı sınıflandırma yöntemleri uygulanabilir. Bu yöntemler, sınıflandırma doğruluğunu ve verimliliğini artırmaya yönelik öğrenme ve adaptasyon yeteneğine sahiptir.

Öğrenme Tabanlı Sınıflandırma, VIS-NIR spektrum analizi verilerini kullanarak aşağıdaki alanlarda uygulanabilir:

- Tarım ürünlerinin hasat zamanı: LC, tarım ürünlerinin olgunluk seviyelerinin belirlenmesi ve uygun hasat zamanlarının tahmin edilmesi için kullanılabilir. Bu, ürünlerin kalitesini ve dayanıklılığını artırarak, daha iyi sonuçlar elde etmeye yardımcı olur.

- Gıda kalitesi ve güvenliği: LC, gıda ürünlerinin kalitesi ve güvenliği ile ilgili faktörleri sınıflandırmak ve analiz etmek için kullanılabilir. Örneğin, mikroorganizma tespiti, besin değerleri ve kimyasal bileşenler gibi alanlarda kullanılabilir.

- Bitki hastalıkları ve zararlı tespiti: LC, bitki hastalıkları ve zararlıların teşhisinde ve sınıflandırılmasında kullanılabilir. Bu, erken müdahale ve kontrol önlemlerinin alınmasını sağlayarak, verim kayıplarının önlenmesine yardımcı olur.

- Otomatik sıralama ve sınıflandırma: LC, meyve, sebze ve diğer tarımsal ürünlerin otomatik sıralamasında ve sınıflandırılmasında kullanılabilir. Bu, hızlı ve doğru sıralama için özelliklerin otomatik olarak çıkarılmasını ve işlenmesini sağlar, bu sayede üretim süreçlerinin verimliliği artar ve insan hataları azalır. Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM): LSTM, özellikle zaman serisi verileri gibi uzun süreli bağımlılıklar içeren verilerin analizi için kullanılan bir derin öğrenme yöntemidir. Bu yöntem, gıda ve tarımsal ürünlerin depolanması sırasında kalite bozulmalarının izlenmesi için kullanılabilir.

Öğrenme Tabanlı Sınıflandırma, derin öğrenme tekniklerinin esnekliği ve doğruluğu sayesinde VIS-NIR spektrum analizi verilerinin işlenmesi ve yorumlanması için etkili bir yöntemdir. Bu yöntemler, gıda ve tarım sektörlerinde ürün kalitesini, güvenliğini ve sürdürülebilirliğini iyileştirmeye yardımcı olur. Ayrıca, öğrenme tabanlı sınıflandırma algoritmaları ve modelleri, farklı veri tipleri ve yapılarıyla uyumlu olacak şekilde sürekli olarak geliştirilmekte ve güncellenmektedir. Bu sayede, LC yöntemleri, sektörün ihtiyaçlarını karşılamak ve değişen taleplere yanıt vermek için daha fazla potansiyele sahiptir.

Lojistik Regresyon (LR): Lojistik regresyon, istatistiksel bir sınıflandırma yöntemi olup, genellikle ikili sınıflandırma problemlerinde kullanılır. Bu yöntem, bağımsız değişkenlerle bağlantılı olarak bağımlı değişkenin olasılığını tahmin etmek için bir lojistik fonksiyon kullanır. Lojistik regresyon, doğrusal regresyondan farklı olarak, bağımlı değişkenin kesikli olması durumunda uygundur.

VIS-NIR spektroskopisi verilerinin analizinde lojistik regresyonun kullanılması aşağıdaki adımları içerir:

- Veri Hazırlığı: Verileri, etiketli örnekler (ör. bileşen sınıfları) içeren bir eğitim setine dönüştürün. Bu, lojistik regresyon modelinin eğitimi sırasında gerekli bağımsız değişkenler ve bağımlı değişkenlerin ilişkisini öğrenmesine yardımcı olacaktır.

- Model Eğitimi: LR modelini eğitim setinde eğitin. Bu süreç, modelin bağımsız değişkenlerin kombinasyonlarından bağımlı değişkenin olasılığını tahmin etmek için en uygun parametreleri öğrenmesini sağlar.

- **Model Değerlendirmesi:** Eğitilmiş modelin performansını değerlendirmek için doğrulama ve/veya test veri kümesi üzerinde analiz yapın. Bu, modelin ne kadar iyi çalıştığını ve gerçek dünya verileriyle ne kadar uyumlu olduğunu görmeye yardımcı olur.

- **Tahmin:** Eğitilmiş modeli, yeni örneklerin sınıflarını tahmin etmek için kullanın. Bu, VIS-NIR spektroskopisi ile elde edilen verilerin analiz edilerek gıda ve tarım uygulamalarındaki farklı özelliklerin ve sınıfların belirlenmesine yardımcı olur.

Lojistik regresyon, basit ve yüksek yorumlanabilirliğe sahip bir yöntem olarak, VIS-NIR spektroskopisi verilerinin analizi için kullanılabilir. Bu yöntem, özellikle ikili sınıflandırma problemlerinde başarılı sonuçlar sunarken, çok sınıflı problemlerde de kullanılabilir. Lojistik regresyonun kullanılması, gıda ve tarım sektörlerindeki ürün kalitesi ve güvenliğini değerlendirmeye ve geliştirmeye katkıda bulunur.

Destek Vektör Makinesi (SVM): SVM, sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılabilen güçlü ve esnek bir derin öğrenme yöntemidir. VIS-NIR spektroskopisi ile elde edilen verilerin analizinde tarım ve gıda uygulamalarında başarıyla kullanılabilir. Özellikle yüksek boyutlu veri kümeleri için uygundur ve doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerde iyi sonuçlar elde edebilir. SVM, özellik vektörlerini yüksek boyutlu bir uzaya yerleştirerek ve bu uzayda en iyi ayırım hiperdüzlemi (veya marjı) bularak sınıfları ayırmaya çalışır.

Tarım ve gıda alanında, SVM modelleri, VIS-NIR spektroskopisi verilerini kullanarak ürün kalitesi, içerik ve yapı gibi özellikleri tahmin etmek için uygulanabilir. Örneğin, SVM modelleri meyve ve sebzelerin olgunluk seviyelerini ve besin içeriğini belirlemek, tahıl ürünlerinin protein ve nem içeriğini ölçmek ve et ve süt ürünlerinin kalitesini değerlendirmek için kullanılabilir.

SVM'nin uygulanması, gıda ve tarım sektörlerinde ürün kalitesini, güvenliğini ve sürdürülebilirliğini değerlendirmeye ve geliştirmeye yardımcı olur. Başarılı sınıflandırma ve regresyon kabiliyeti sayesinde, SVM modelleri gıda ve tarım ürünlerinin niteliklerini ve sınıflarını belirlemede önemli bir rol oynar. Bu, sektörün ihtiyaçlarını karşılamak ve değişen taleplere yanıt vermek için daha fazla potansiyele sahip olmasını sağlar.

Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN): RNN, özellikle zaman serisi verileri ve sıralı verilerle çalışmak için tasarlanmış bir derin öğrenme yöntemidir. RNN'ler, geçmiş bilgileri dikkate alarak mevcut durumu tahmin etme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, VIS-NIR spektroskopisi ile elde edilen verilerin analizinde tarım ve gıda uygulamalarında başarıyla kullanılabilir.

RNN modelleri, özellikle zamanla değişen özelliklere sahip gıda ve tarım ürünleri için etkili olabilir. Örneğin, RNN'ler, meyve ve sebzelerin büyüme

ve olgunlaşma süreçlerini izlemek, tarımsal ürünlerin hasat zamanını tahmin etmek ve gıda ürünlerinin raf ömrü ve bozulma süreçlerini değerlendirmek için kullanılabilir.

Tarım ve gıda alanlarında RNN modellerinin kullanılması, ürün kalitesi, güvenlik ve sürdürülebilirliği değerlendirmeye ve geliştirmeye yardımcı olur. RNN'lerin sıralı verilere uyum sağlama ve geçmiş bilgileri kullanarak tahminlerde bulunma yeteneği, gıda ve tarım ürünlerinin niteliklerini ve sınıflarını belirlemede önemli bir rol oynar. Bu, sektörün ihtiyaçlarını karşılamak ve değişen taleplere yanıt vermek için daha fazla potansiyele sahip olmasını sağlar.

Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM): LSTM, tekrarlayan sinir ağlarının (RNN) bir çeşididir ve özellikle uzun süreli bağımlılıkları öğrenme konusunda başarılıdır. LSTM, RNN'lerin sıralı verilerle çalışma yeteneğini korurken, "uzun vadeli hafıza" özelliği sayesinde daha karmaşık ve uzun süreli bağımlılıkları modelleyebilir. Bu özellik, VIS-NIR spektroskopisi ile elde edilen verilerin analizinde tarım ve gıda uygulamalarında başarıyla kullanılabilir.

LSTM modelleri, özellikle zamanla değişen özelliklere sahip gıda ve tarım ürünleri için etkili olabilir. Örneğin, LSTM'ler, meyve ve sebzelerin büyüme ve olgunlaşma süreçlerini daha doğru bir şekilde izlemek, tarımsal ürünlerin hasat zamanını tahmin etmek ve gıda ürünlerinin raf ömrü ve bozulma süreçlerini değerlendirmek için kullanılabilir.

Tarım ve gıda alanlarında LSTM modellerinin kullanılması, ürün kalitesi, güvenlik ve sürdürülebilirliği değerlendirmeye ve geliştirmeye yardımcı olur. LSTM'lerin uzun süreli bağımlılıkları öğrenme yeteneği ve geçmiş bilgileri kullanarak tahminlerde bulunma becerisi, gıda ve tarım ürünlerinin niteliklerini ve sınıflarını belirlemede önemli bir rol oynar. Bu, sektörün ihtiyaçlarını karşılamak ve değişen taleplere yanıt vermek için daha fazla potansiyele sahip olmasını sağlar. Bu derin öğrenme yöntemleri, VIS-NIR spektrum analizi verilerinin analizinde kullanılabilir ve gıda ve tarımsal ürünlerin kalite kontrolü için oldukça etkilidir. Ancak, hangi yöntemin kullanılacağı, verilerin özelliklerine, analiz yapılacak problemlere kullanılacak veri setinin büyüklüğüne bağlıdır. Bu nedenle, doğru derin öğrenme yöntemi seçimi ve veri setinin uygun hazırlanması son derece önemlidir.

Ayrıca, derin öğrenme yöntemlerinin başarısı, kullanılan veri setinin kalitesine de bağlıdır. Bu nedenle, doğru ve yeterli veri toplama, işleme ve temizleme yöntemleri kullanılarak, yeterli sayıda ve çeşitlilikte veri toplanması gerekmektedir. Ayrıca, veri setlerinin doğru etiketlenmesi ve veri setlerinin dengeli olması, derin öğrenme modellerinin doğruluğunu artıracaktır.

3.VIS-NIR SPEKTROSKOPİSİNE DAYALI YAPILAN ARAŞTIRMALAR

(Zhang, Yang, Lin, and Ying ,2021)'a göre spektral analiz için derin öğrenme yaklaşımlarının gıda ve tarımsal ürün kalitesinin değerlendirilmesinde kullanımını tartışılmıştır. Bu yöntemlerin uçtan uca analiz yoluyla insan uzmanlığına/bilgisine bağımlılığı azaltarak gelişmiş hassasiyet sunduğunu vurgulamaktadır.

(González-Domínguez, Sayago, and Ángeles Fernández-Recamales, 2021) yaptıkları çalışmada ispanyol şarap sirkelerini coğrafi kökenlerine göre doğrulamak ve izlemek için UV-Vis spektroskopisi ve istatistiksel araçların kullanılmasını önermektedir. Çalışma, bu yöntemin toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivite gibi fizikokimyasal özellikleri doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir.

(Abu-Khalaf and Hmidat ,2020) zaman ve maliyeti düşürmeye odaklanarak zeytinyağının kalitesini değerlendirmek için Görünür/Yakın Kızılötesi (VIS/NIR) spektroskopisinin kullanımını tartışıyor. Çalışma, bu yöntemin asitlik ve peroksit parametrelerini doğru bir şekilde modelleyebildiğini ve farklı kalite zeytinyağı gruplarını ayırt edebildiğini buldu. Sohn, Pandian, ve ark. (2021) tarım ve gıda sistemlerinde genetiği değiştirilmiş organizmaları tanımlamak için yakın kızılötesi spektroskopinin (NIRS) kullanımını tartışmıştır. NIRS'nin PCR ve ELISA gibi önceki teknolojilere göre avantajlarını vurgular, hız dahil, tahribatsız analiz, maliyet etkinliği, ve güvenilir doğruluk sağladığı belirtilmiştir.

(Rong, Wang, Ying, Zhang, and Zhang ,2020), VIS-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme kullanarak farklı şeftali çeşitlerini tanımlamak için bir yöntem önermektedir. Önerilen modelin elde ettiği doğruluk oranı, doğrulama aşamasında% 100 ve test veri setinde% 94'e kadar çıkmıştır ve bu da şeftali çeşitlerinin tahribatsız ölçüm yeteneğinden elde edilen spektral bilgilerle başarılı bir şekilde tanımlandığını göstermektedir.

(Chen, Bin, Zou, and Ding, 2021) yaptıkları makalede, derin öğrenme yaklaşımı ile birlikte yakın kızılötesi (NIR) spektroskopisi kullanarak tütün yapraklarının olgunluk düzeyini sınıflandırmak için objektif ve güvenilir bir teknik önermektedir. Önerilen yöntem doğru sağlayabilir, Olgunluk seviyelerini objektif olarak ayırt ederek tütün yapraklarının kalitesini artırmak için bilimsel araçlar geliştirilebilir.

(Sohn, Oh, ve ark., 2021), altı farklı Amaranthus türünü hızla sınıflandırmak için Vis-NIR spektrumlarını ve kemometrik yaklaşımları kullanmanın fizibilitesini araştırmaktadır. Sonuçlar, bu yöntemin çeşitli coğrafi bölgelerdeki bu bitki türleri arasında etkili bir şekilde ayırım yapabildiğini göstermektedir., yabancı otları yönetmek veya gıda uygulamalarını izlemek için yararlı olabileceğini belirtilmiştir.

(Mouazen, Karoui, Baerdemaeker, and Ramon,2006) toprak nem içeriğini ölçmek için VIS-NIR spektroskopisinin kullanımını ve bunun diğer toprak özelliklerinin ölçülmesi üzerindeki etkisini tartışmaktadır.Çalışma, MC'nin spektrumlarından katkısı en küçük kareler (PLS) regresyon analizi ve Faktöriyel Ayrımcılık Analizi (FDA) kullanarak farklı MC gruplarına sınıflandırarak çıkarılması için bir yöntem önermektedir.

(İ.Wang, Huang, Fan, and Lu,2015) , beş çeşit yeşil çay arasında ayırım yapmak ve neredeyse kızılötesi spektroskopi kullanarak toplam polifenol içeriğini tahmin etmek için bir yöntem önermektedir., ultraviyole görünür spektroskopi, ve kemometrik algoritmalar kullanılarak yapılan önerilen yaklaşım hızlı, doğru ve uygun maliyetlidir.

(Xu, Chu, Fu, Wang, and Wu ,2021), görünür ve kızılötesine yakın spektroskopi kullanarak toprak organik karbon içeriğini belirlemek için farklı çok değişkenli kalibrasyon ve ön işleme tekniklerini karşılaştırır. Sonuçlar, birinci türev yansıma spektrumları ile destek vektör makine regresyonunun en doğru yöntem olduğunu göstermektedir.

(J.Wang, Ding, Abulimiti, and Cai ,2018) , toprak tuzluluğunu tespit etmek için görünür ve yakın kızılötesi spektroskopinin ön işleminde fraksiyonel türevin kullanımını tanıtmaktadır. Çalışma, R2, RMSE ve RPD için optimal değerler olarak 1.5 mertebeden türev absorbansına sahip rastgele orman kullanarak toprak tuzluluğunu tahmin etmek için kararlı bir model oluşturmaktadır.

(Nawaf and Mazen ,2014) , zeytin yapraklarında Zeytin Yaprağı Lekesi (OLS) hastalığını tespit etmek için VIS/NIR spektroskopisinin kullanımını tartışılmaktadır.İki sınıflandırma yöntemi kullanılmıştır. Taşınabilir cihazlar kullanarak daha fazla araştırma ve potansiyel saha uygulamaları için umut verici sonuçlar elde edilmiştir.

(Zhao, Feng, Chen, and Jia ,2019) yaptıkları araştırma makalesi, görünür kızılötesine yakın hiperspektral görüntüleme kullanarak şımarık sığır eti ile sığır eti tağşisini tespit etmek için çok değişkenli veri analizi yöntemlerinin kullanımını araştırmaktadır. Çalışma, farklı modelleme algoritmalarını ve dalga boyu seçim yöntemlerini karşılaştırıyor, nihayetinde sığır etinde homolog zina yapanı tespit etmek için Vis-NIR hiperspektral görüntülemenin kullanılmasının mümkün olduğunu gösterilmiştir.

Tablo 1: VIS-NIR Spektroskopisi ve Derin Öğrenmeye dayalı gıda tarımsal çalışmaları

Yazar(lar)	Çalışmanın Adı	Derin Öğrenme Teknikleri
(Lu, Q et al., 2017).	Görünür/kızılötesine yakın hiperspektral görüntüleme kullanılarak litchi pericarp esmerleşmesinin hızlı ve tahribatsız tespiti	VIS-NIR spektroskopisi ve ANN
(Prieto, N et al., 2017)	Et, yağ ve et ürünlerini karakterize etmek için yakın kızılötesi spektroskopinin ilke ve uygulamalarının gözden geçirilmesi	VIS-NIR spektroskopisi ve ANN
(Jiang, H., & Liu, S. 2017)	Yakın kızılötesi spektroskopisi ile gıda kalitesi tespiti için derin öğrenme	CNN
(Li, Q et al.,2017)	Tohum kalitesi ve güvenlik denetimi için hiperspektral görüntüleme: bir inceleme	RNN
(Shen, F et al., 2018)	Derin öğrenmeye dayalı VIS/NIR spektroskopisi kullanılarak mısır çeşitlerinin tanımlanması	ANN
(Zhang, C et al.,2019)	Yapay sinir ağlarına dayalı görünür/kızılötesine yakın spektrumlar için bir ön işleme yönteminin geliştirilmesi	VIS-NIR spektroskopisi ve ANN
(Yan, S., & Zhang, S. 2019)	Derin öğrenme modelleriyle hiperspektral görüntü sınıflandırması: bir inceleme	LSTM
(Liang, N et al., 2019)	Üç boyutlu evrişimli sinir ağına dayalı hiperspektral görüntü sınıflandırması	CNN
(Ma, L et al., 2020)	Tahıl kalitesi için derin öğrenmeye dayalı hiperspektral görüntü sınıflandırması	CNN ve ANN
(Chen, P., Sun, Z., & Li, Y. 2020)	Yakın kızılötesi hiperspektral görüntüleme için derin öğrenme: bir inceleme	CNN ve RNN
(Zhang et al., 2020)	Derin öğrenme ile kaplanmış mısır tanelerinin çeşitlerinin tanımlanması için yakın kızılötesi hiperspektral görüntüleme uygulaması	LR ve SVM, CNN, RNN, LSTM
(Dhyani and Pandya, 2021)	Tarımda kuraklık ve tahmin için derin öğrenme odaklı uydudan uzaktan algılama	LSTM + Visible Light

Kaynak: Tablo yazarlar tarafından hazırlanmıştır.

4.SONUÇLAR

Bu makale, görünür ve yakın kızılötesi (Vis-NIR) spektroskopisi ve derin öğrenme yöntemlerinin gıda ve tarımsal ürünlerin kalite değerlendirmesindeki potansiyelini incelemiştir. İncelenen önceki çalışmalar, Vis-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme tekniklerinin kombinasyonunun, gıda ve tarımsal ürünlerin kalite parametrelerinin hızlı, hassas ve yıkıcı olmayan bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıdığını göstermektedir. Vis-NIR spektroskopisi, gıda ve tarımsal ürünlerin iç ve dış özelliklerini analiz etmeyi sağlayan yüksek çözünürlüklü spektral veriler sağlamaktadır. Derin öğrenme yöntemleri ise, bu karmaşık ve yüksek boyutlu veri kümelerinin analizinde etkili olup, daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, Vis-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme yöntemlerinin

uygulanması, spektral verilerin işlenmesi, özellik seçimi ve model optimizasyonu gibi zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, bu yöntemlerin başarılı uygulanabilmesi için, daha gelişmiş veri toplama ve işleme tekniklerinin kullanılması, algoritma optimizasyonu ve genelleştirme kabiliyetinin artırılması gibi konulara odaklanılması gerekmektedir. Gelecekteki araştırmalar, Vis-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme yöntemlerinin geliştirilmesi, yeni uygulama alanlarının keşfi ve bu yöntemlerin gıda ve tarımsal ürünlerin kalite değerlendirmesinde daha yaygın olarak kullanılması için çalışmalara ihtiyaç duymaktadır. Bu sayede, gıda güvenliği ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının desteklenmesi ve tüketicilerin sağlığına katkıda bulunması hedeflenebilmektedir.

Sonuç olarak, VIS-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme teknolojileri, gıda ve tarımsal ürün kalitesinin hızlı, doğru ve otomatik olarak değerlendirilmesinde önemli bir araç haline gelmektedir. Bu teknolojiler, gıda endüstrisinde ürün kalitesinin artırılması ve kalite kontrol süreçlerinin optimize edilmesi için potansiyel sağlamaktadır. Derin öğrenme algoritmalarının kullanımı, büyük miktarda verinin işlenmesinde etkili olabilen bir yöntemdir. Gıda endüstrisi için önemli bir avantaj, derin öğrenme modellerinin sınıflandırma ve tahmin performansının zamanla artmasıdır. Ayrıca, bu teknolojiler, gıda endüstrisinin sürdürülebilirliğini artırmak için atık yönetimi ve kaynak verimliliği açısından da önemli bir araçtır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin uygulanması bazı zorluklarla karşılaşabilmektedir. Örneğin, verilerin kalitesi, örneklem boyutu, modele uygun veri seçimi ve ağ yapısı gibi faktörlerin etkisi modellerin doğruluğunu ve güvenilirliğini etkileyebilmektedir. Bu nedenle, doğru sonuçlar elde etmek için bu faktörlerin dikkatli bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Sonuç olarak, VIS-NIR spektroskopisi ve derin öğrenme teknolojileri, gıda ve tarımsal ürün kalite değerlendirmesi için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ancak, bu teknolojilerin uygulanması ve optimize edilmesi, kalite kontrol süreçlerinin iyileştirilmesi ve gıda endüstrisinin sürdürülebilirliğinin artırılması için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışması gerektirmektedir.

KAYNAKÇA

- Abu-Khalaf, N., & Hmidat, M. (2020). Visible/Near Infrared (VIS/NIR) spectroscopy as an optical sensor for evaluating olive oil quality. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105445.
- Chen, Y., Bin, J., Zou, C., & Ding, M. (2021). Discrimination of fresh tobacco leaves with different maturity levels by near-infrared (NIR) spectroscopy and deep learning. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2021.
- Chen, P., Sun, Z., & Li, Y. (2020). Deep learning for near-infrared hyperspectral imaging: A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 124, 115795.
- González-Domínguez, R., Sayago, A., & Ángeles Fernández-Recamales. (2021). Potential of ultraviolet-visible spectroscopy for the differentiation of spanish vinegars according to the geographical origin and the prediction of their functional properties. *Foods*, 10(8), 1830.
- Jiang, H., & Liu, S. (2017). Deep learning for food quality detection with near-infrared spectroscopy. *International Journal of Food Properties*, 20(sup3), S3176-S3187.
- Li, Q., Liu, Y., Liu, M., & Sun, B. (2017). Hyperspectral imaging for seed quality and safety inspection: a review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 91, 122-132.
- Liang, N., Huang, D., Wang, K., & Zhao, C. (2019). Hyperspectral image classification based on three-dimensional convolutional neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(10), 10501-10518.
- Lu, Q., Sun, J., Zhan, L., & Gu, S. (2017). Rapid and nondestructive detection of litchi pericarp browning using visible/near-infrared hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 198, 10-16.
- Ma, L., Ma, T., Liu, X., Wang, Y., & Zhang, X. (2020). Hyperspectral image classification based on deep learning for grain quality. *Journal of Cereal Science*, 91, 102872.
- Mouazen, A. M., Karoui, R., Baerdemaeker, J. D., & Ramon, H. (2006). Classification of soils into different moisture content levels based on VIS-NIR spectra. In *2006 ASAE Annual Meeting* (p. 1).
- Nawaf, A.-K., & Mazen, S. (2014). (Vol. 2).
- Prieto, N., Pawluczyk, O., Dugan, M. E. R., & Aalhus, J. L. (2017). A review of the principles and applications of near-infrared spectroscopy to characterize meat, fat, and meat products. *Applied Spectroscopy*, 71(7), 1402-1426.
- Rong, D., Wang, H., Ying, Y., Zhang, Z., & Zhang, Y. (2020). Peach variety detection using VIS-NIR spectroscopy and deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105553.
- Shen, F., Zhang, M., Liu, Z., & Yang, G. (2018). Identification of maize varieties using VIS/NIR spectroscopy based on deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 238-244.

- Sohn, S.-I., Oh, Y.-J., Pandian, S., Lee, Y.-H., Zaukuu, J.-L. Z., Kang, H.-J., . . . Shin, E.-K. (2021). Identification of *Amaranthus* species using visible-near-infrared (vis-NIR) spectroscopy and machine learning methods. *Remote Sensing*, 13(20), 4149.
- Sohn, S.-I., Pandian, S., Oh, Y.-J., Zaukuu, J.-L. Z., Kang, H.-J., Ryu, T.-H., . . . Cho, B.-K. (2021). An overview of near infrared spectroscopy and its applications in the detection of genetically modified organisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(18), 9940.
- Wang, J., Ding, J., Abulimiti, A., & Cai, L. (2018). Quantitative estimation of soil salinity by means of different modeling methods and visible-near infrared (VIS-NIR) spectroscopy, Ebinur Lake Wetland, Northwest China. *PeerJ*, 6, e4703.
- Wang, X., Huang, J., Fan, W., & Lu, H. (2015). Identification of green tea varieties and fast quantification of total polyphenols by near-infrared spectroscopy and ultraviolet-visible spectroscopy with chemometric algorithms. *Analytical Methods*, 7(2), 787-792.
- Yan, S., & Zhang, S. (2019). Hyperspectral image classification with deep learning models: a review. *Remote Sensing*, 11(20), 2449.
- Xu, X., Qi, H., Xu, J., & Xin, Q. (2019). Spectral-spatial classification of hyperspectral data using a convolutional neural network and random forest. *Remote Sensing*, 11(14), 1626.
- Xu, M., Chu, X., Fu, Y., Wang, C., & Wu, S. (2021). Improving the accuracy of soil organic carbon content prediction based on visible and near-infrared spectroscopy and machine learning. *Environmental Earth Sciences*, 80(8), 326.
- Zhang, C., Feng, Y. Z., & Feng, X. Z. (2019). Development of a pre-processing method for visible/near-infrared spectra based on artificial neural networks. *Analytical Letters*, 52(7), 1079-1096.
- Zhang, X., Yang, J., Lin, T., & Ying, Y. (2021). Food and agro-product quality evaluation based on spectroscopy and deep learning: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 431-441.
- Zhao, H.-T., Feng, Y.-Z., Chen, W., & Jia, G.-F. (2019). Application of invasive weed optimization and least square support vector machine for prediction of beef adulteration with spoiled beef based on visible near-infrared (Vis-NIR) hyperspectral imaging. *Meat science*, 151, 75-81.

Bölüm 2

SÜPER İLETKEN KABLOLARIN UYGULAMA ALANLARI VE GÜNCEL GELİŞMELER

*V. Tuna ŞABA¹,
Zuhal OKTAY¹
Can COSKUN¹
Bahadır BİRECİKLİ²*

¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye,
tunasaba93@gmail.com, 2217104011@std.idu.edu.tr,
<https://orcid.org/0000-0001-5753-1521>

¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye,
can.coskun@idu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-4100-0296>, zuhal.oktay@
idu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-6167-7048>

² Batman Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü,
Batman, Türkiye Bahadır.Birecikli@batman.edu.tr,
<https://orcid.org/0000-0002-6765-0097>



1.GİRİŞ

Günümüzde elektrik üretim sistemleri teknolojik toplumun önemli alt yapılarından biri olarak bağımsız sistemler olarak nadiren kullanılmaktadır. İnsanlar için standart haline gelmekte olan bu sistem, kontrolü kolay, güvenilir ve temiz olduğu bilinmektedir. Ancak elektrik üretim, dağıtım ve iletim işlemlerinde belirli zorluklar yaşandığı bilinmektedir. Bu zorlukları aşabilmek için elektrik üretim sistemleri ile diğer ekipmanlar arasında iletişimi sağlamak için kullanılan bir dizi teknoloji bulunmaktadır. Bu teknolojiler, jeneratör, trafo, kablo ve iletim hattı gibi güç gibi güç sistemleri kullanılmaktadır. Bu teknolojiler de iletkenlik için bakır ve alüminyum kullanılmaktadır. Ayrıca elektrik sistemleri için süper iletken kablolar da kullanılmaktadır. Süper iletken kablolar, yüksek akımı nispeten düşük voltajlarda iletmeye noktasında büyük bir avantaja sahiptir. Süper iletken güç kablosu, düşük iletim kaybı, büyük güç kapasitesi, küçük alan koridoru ve çevre dostu özellikleri ile yüksek voltajlı güç iletimine alternatif olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle süper iletken güç kabloları elektrik sistemlerinin ihtiyaçlarını ve gereksinimlerini karşılamak için teknolojik olarak faydalı olduğu görülmektedir.

Süper iletken malzemeler, belirli bir düşük sıcaklığın (kritik sıcaklık) altında sıfır direnç olgusu, bu olay için elektrik enerjisinde hiçbir dağılıma olmadığı anlamına gelen sınırsız akıma yol açar. Bu özelliği, malzeme bu düşük sıcaklığın altındayken harici manyetik alana yerleştirilirse, malzemenin içinden manyetik alanın dışarı atılması izlemektedir. Kritik sıcaklıklarının altındayken bu benzersiz özelliklere sahip olan malzemeler, 1911 yılında ünlü fizikçi H. K. Onnes tarafından keşfedilmiştir. McFee'nin 1961'de ilk olarak süper iletken kabloyu keşfetmiştir. Ayrıca 1970'ler ve 1980'lerde Helyum soğutma sistemi kullanan düşük sıcaklıkta süper iletken (LTS) kablosu için çalışılmaktadır. 1986 yılında Bednorz ve Muller tarafından Helyum yerine sıvı Nitrojen (LN) kullanan yüksek sıcaklık süper iletken (HTS) malzemesi geliştirilmiş, HTS kablosu ile ilgili araştırmalar sürekli ilerlemiş ve günümüzde endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte dağıtım sınıfındaki süper iletken kablo, aynı boyuttaki geleneksel orta gerilim kablosundan (XLPE) yaklaşık 5 kat daha fazla güç sağladığı görülmektedir. Belirtilen özelliklere ek olarak, süper iletkenler birçok olumlu özelliğe sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle her sektördeki uygulamalar için mükemmel potansiyellere sahiptir. Ayrıca ABD, Çin, Japonya, Avrupa ve Kore dahil olmak üzere önde gelen birçok ülke süper iletken kablo testi operasyonunda deneyim kazanmaktadır. Böylece mühendislik açısından iyi uygulanabilir yerler bulmaktadır.

Süper iletken güç kablosu laboratuvarlardan pratik uygulamalara taşınmaktadır. Bu, geleneksel elektrik enerjisi iletim yöntemlerini ve hatta elektrik şebekesi mimarisini yeniden şekillendirmektedir. Süper iletken kablolar günümüz teknolojisiyle birleşerek birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanla-

ra, yenilenebilir enerji kaynakları, şehir şebeke hatları, metro ve tren hatları, elektrikli uçak, elektrikli araba, LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz) teknolojisi, tokamak uygulamaları ve indüksiyonlu ısıtıcı teknolojisi gibi uygulamalar örnek verilebilir. Bu çalışmada, süper iletken kablo teknolojisinin son on yılda dünya çapındaki araştırma durumunu gözden geçirmektedir. Böylece tanıtım projeleri görülmektedir. Yapılacak Ar-Ge faaliyetleri sonucunda süper iletken güç kablolarının maliyetlerinde daha büyük azalma olabileceğini görülmektedir. Kentsel alanlarda güç kaynağı ve trafo merkezlerinin birbirine bağlanması gibi uygulamalarda teknik atılımlar yapılmıştır. Yapılan çalışma trendleri incelendiğinde, Uygulama alanlarında esneklik, güvenilirlik ve basitlik konularında önemli gelişmeler olacağı öngörülmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Chen ve ark. (Chen ve ark., 2022) yapmış olduğu çalışmada 100 MW gücünde bir veri merkezinde güç dağıtımını noktasında enerji tasarrufu sağlamak için süper iletken kullanımı incelenmiştir. İncelenen veri merkezi yenilenebilir ve temiz enerji kullanmaktadır. AC ve DC güç aktarımı ile süper iletken kabloyla değişimi noktasında sağlanacak enerji tasarrufu analiz edilmiştir. Süper iletken kablolarda kullanılan HTS malzemesinin termal ve elektriksel karakteristikleri ayrıntılı bir biçimde analiz edilmiştir. HTS-110 kV, HTS-10 kV, HTS-0.4 kV olmak üzere 3 süper iletken güç iletimi durumunu incelemiştir. AC ve DC güç iletimi noktasında 6 farklı seçenek farklı voltaj seviyelerinde karşılaştırılmıştır. Bu voltaj seviyeleri 110 kV, 110 kV, 0.4 kV şeklinde ele almakla birlikte farklı iletim mesafeleri ile kullanmışlardır. 10 kV 10 km durumu için, süper iletken şemanın toplam enerji kaybı, geleneksel AC durumunun yalnızca %1,7'sidir. Yenilenebilir enerjinin üretildiği nokta ile veri merkezi arasına süper iletken kablo döşenmesi durumu dikkate alınarak sistemin ekonomik analizleri farklı voltaj seviyeleri için yapılmıştır. Süper iletken kablo kullanımının geleneksel AC ve DC güç iletimine göre her durumda daha yüksek bir ekonomik faydaya sahip olduğu görülmüştür. 1 km'den daha düşük olan kısa mesafeli güç aktarımı için 0,4 kV en ekonomik seçenek olarak belirlenmiştir. 1 km ile 50 km arasında orta mesafeli güç aktarımı için 10 kV daha ekonomik bağlamda daha verimli bir seçenek olarak tespit edilmiştir. 50 km'den daha yüksek olan uzun mesafeli güç aktarımı için 110 kV en ekonomik seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

Xie ve ark. (Xie ve ark., 2020) tarafından Çin, Şangay'da 35 kV 1,2 km seviyesinde 220 kV trafolar arası bağlantılı yerli ikinci nesil yüksek sıcaklık süper iletken güç kablosu (HTS) projesinin tanıtımını yapmışlardır. Dünyada ilk olacak şekilde 35 kV üç fazlı elektrik iletim sisteminin inşa edilmesi ve işletmeye alınmasını projenin öncelikli hedefleri arasındadır. Projeyi, State Grid Corporation Shanghai Electric Power Company tarafından inşa edilmiş ve bitirilmiştir. Ayrıca sistemin tip testleri de tamamlanmıştır.

Sytnikov ve ark. (Sytnikov ve ark., 2021) 2,4 km Petersburg HTS iletim kablo hattı projesinin testlerini yapmışlardır. Testler sonucunda HTS DC kablo hattının çalışabildiğini ortaya koymuşlardır. İletim hattı boyunca soğutma ve sıcaklık testlerini de başarıyla gerçekleştirmişlerdir. Elektriksel özellikleri, HTS kablunun kritik akımı 4500 A olup kablo içindeki HTS bantlarının kritik akımlarının toplamına eşitken çalışma akımı 2500 A'dır. Yapmış oldukları testlerde hat boyunca önemli bilgiler toplamışlardır. Sıcaklık stabilitesi için hangi çalışma koşullarının gerektiğini belirlemişlerdir. Sürdürülebilir HTS çalışması için 35 l/dk'ya eşit olan optimum LN2 kütle akış hızını tanımlamışlardır. Kablo hattı için yapılan sıcaklık değişimi, basınç düşümü ve ısı yükü hesaplamaları gerçekte elde edilen değerlerle uyumlu olduğu doğrulanmıştır. HTS kablo hattının güç yükü altında gerçekleştirilen hidrolik testlerinin sonuçları; 0145 MPa'ya eşit basınç düşüşü, 94 kW'a eşit toplam ısı yükü, 54 K'ye eşit kablo boyunca ΔT ve 2400 m dahil HTS kablo hattındaki toplam ΔT ters kriyostat 94 K'ye eşit olduğunu görmüştür. Bağlantı elemanlarında yapılan ayarlamalar sonucunda iki yükünde iki katlık bir azalma sağlanabilmiştir.

Nomura ve ark. (Nomura ve ark., 2020) mobil süper iletken manyetik enerji depolama üzerine çalışmışlardır. SMES (süper iletken manyetik enerji depolama) sistemleri, güç sistemi kararlılığının çevrimiçi değerlendirmesi için önemli olduğu görmüşlerdir. 1 MJ sınıfı mobil SMES sistemi için bir tasarım çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları tasarımda MgB2 Rutherford kabloları kullanmışlardır. Elde etmiş oldukları sonuçlar, 12.2 m boyunda bir konteynıra 1 MJ sınıfı mobil SMES bileşenlerinin kurulmasının sağlanabileceğini göstermiştir. MgB2 Rutherford kabloları kullanılarak hiçbir ilave olmaksızın 2 T veya 3 T'ye kadar SMES bobinine uyarlanabileceğini göstermiştir. Yapılan çalışma MgB2 Rutherford kablosu kullanımının 1 MJ kapasiteli mobil SMES sistemi için önemli avantajlara sahip olduğunu göstermiştir.

Masuda ve ark. (Masuda ve ark., 2022) Yokohama şehrinde süper iletken kablolarının gerçek bir enerji nakil hattında uygulanması üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada süper iletken kablunun operasyonel özellikleri ve uzun vadeli özellikleri incelenmiştir. 66 kV seviyesinde maksimum kısa devre akımı 31,5 kA/2 sn olarak belirlenmiştir. Kısa bir örnek kablunun test sonuçları, sıcaklık artışını bastırmak için Cu oluşturucu ve Cu koruyucu katmanın etkinliğini göstermiştir. 3 km SC kablosunun simülasyonunda sıcaklık 2 sn için 31,5 K'de 112 K'ye kadar hesaplamışlardır. 2 sn 10 kA olması durumunda maksimum sıcaklık 76 K olarak hesaplamıştır. Bu durumda SC iletkeni arıza sonrası süper iletken durumda olduğu görmüşlerdir, bu durumda onun hızlı bir biçimde ağa bağlanabileceğini göstermektedir. Süper iletken kablunun döşendiği noktada önceden kaza analizi yapmak ve maksimum kısa devre akım kavramasının önemli olduğunu göstermişlerdir. Model kablunun test sonuçları, kriyostatın nüfuz etmesini önlemek için daha

kalın koruma katmanının gerekli olduğunu göstermiştir. Ancak süper iletken kabloların kompakt yapısından yararlanmak için daha kalın koruyucu tabaka kabul edilmeyebilir. Bu nedenle, ince bir koruma tabakası kullanıldığında, bir toprak arızası sırasında ark boşalması nedeniyle kriyostatın LN2 sızıntısına nüfuz edebileceğini anlamışlardır. LN2 sızıntısı durumuna karşın kapalı mahallerde oksijen seviyesine ve basınç artımına dikkat edilmesi faydalı olacaktır.

Tomita ve ark. (Tomita ve ark., 2022) tarafından metro sahasında süper iletken kablo döşenmesi ve soğutma testi yapılmıştır. Hawaii metro hattı için üçüncü raylı sistem, voltajın nispeten düşük olması nedeniyle büyük miktarda akım gerektiğini belirtmişlerdir. Süper iletken kablo uygulamasının gerilim düşümünü azaltması nedeniyle demiryolu güzergahında enerji tasarrufu sağlayacağını düşünmüşlerdir. Akım ve soğutma testleri için süper iletken kablo ünitesi aktif bir demiryolu hattına kurulmuştur. Soğutma testleri için soğutma sistemi (Stirling) ve sirkülasyon pompası kullanılmışlardır. Sistemin kablo sistemini kararlı bir şekilde soğutma yeteneğine sahip olduğunu bulmuştur. Arıza giderme için soğutma testinde, güç kapatıldıktan sonra güç tekrar açıldığında sistemin işlevinin eski haline geldiğini doğrulamışlardır. Mevcut testte, iki süper iletken katmandan oluşan süper iletken kablonun, bir katman başına 6 kA akım taşıyabildiği ve elektrikli vagon çalışması için yeterli akım kapasitesi sağlayabildiğini doğrulamışlardır. Süper iletken kablo, bir demiryolu güzergahı boyunca, bir kısmı raylardan geçecek şekilde yerleştirmiştir. Kablonun titreşim ve diğer dış faktörlerden etkilenmemiş ve sorunsuz bir şekilde çalışmıştır.

Zhu ve ark. (Zhu ve ark., 2019) tarafından enerji taşıma sisteminin yüksek verimliliği arayışında, LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz) ile soğutulan yeni bir yüksek sıcaklıkta süper iletken elektrik güç iletim sistemi araştırmışlardır. İncelemede soğutucu akışkan olarak LNG kullanılmıştır. LNG, 85-95 K sıcaklık aralığında çalıştırılan süper iletken kablo için kullanım imkânına sahiptir. Süper iletken kablo sistemiyle güç iletimi ve soğutucu akışkan olarak LNG birleşik olarak incelenmiştir. Sıvılaştırılmış doğal gaz ve elektrik enerjisi aynı anda düşük enerji kaybıyla taşınabilir olduğunu görmüştür. Kombine iletim sisteminin enerji verimliliği %96,9 iken konvansiyonel LNG taşıma sistemindeki %71,9 olabileceğini anlamışlardır. Kombine iletim sistemi enerjinin yüksek verimde iletimine imkân sağlayabileceği belirlenmiştir. En yüksek aktarım verimini elde etmek için, LNG'nin optimal akış hızı 1,0~1,5 m/s ve sıvı nitrojeninki 1,0 m/s içinde olduğunu görmüştür. Kombine iletim sisteminin verimi boru çapıyla artış göstermektedir. Isı yalıtım tabakası ve kalınlığı kriyojenik soğutma sisteminin güç tüketimi için oldukça önemli faktördür. Buda toplam sistemin güç tüketimini etkilemektedir. Isı yalıtım kalınlığının artırılması oldukça önemlidir.

Yamaguchi ve ark. (Yamaguchi ve ark., 2020) havacılık için hafif, yüksek akım ileten süper iletken bir kablo üzerine çalışmışlardır. Gelişmiş elektrikli uçaklar (MEA), havacılık sektörünün gelişimi ve yeni nesil uçakların oluşturulması noktasında önem arz etmektedir. Elektrikli uçaklarda düşük volta- ja sahip DC elektrik sistemleri tercih edilmektedir. Bunun en önemli sebebi havada topraklama yapılamayacağı ve yalıtım voltajının düşük olmasıdır. Yüksek güç gereksinimlerinin karşılanabilmesi için yüksek akım değerlerine ulaşılması gerekmektedir. HTS (yüksek sıcaklıkta süper iletken) teknolojisi bu noktada büyük avantajlara sahiptir. Yazarlar çalışmada literatüre yeni bir HTS kablo önerisinde bulunmuşlardır. Önerdikleri kabloda her bir HTS bandı için ters yönlü akıma sahip istiflenmiş bir iletken kullanmışlardır. Yığılmış iletkende akım dengesizliğini ortadan kaldırmak için, Roebel iletken tasarımı yerine kurşun direncini kullanmışlardır. Kriyojenik sıvıyı iletecek olan boru, oldukça düşük bir ağırlığa sahip olan magnezyum-lityum alaşımından yapılmıştır. 77 K sıvı nitrojen çalışma sıcaklığında, birim uzunluk başına ağırlık-akım oranının 0,5 kg/A/km'den az olduğunu ifade edilmiştir. Ayrıca magnezyum-lityum alaşımli kablunun bakır kablodan daha hafif olacağı ortaya konmuştur. Sıvı hidrojen kullanımı durumunda (20 K) birim uzunluk başına ağırlık-akım oranının 0,1 kg/A/km'den daha düşük bir seviyeye çekilebileceği değerlendirilmesine bulunmaktadır. 0,1 kg/A/km değeri gelişmiş elektrikli uçakların gereksinimini karşılayabilecek bir seviyedir.

Zheng ve ark. (Zheng ve ark., 2023) LSG (sıvılaştırılmış kaya gazı) ve elektriğin bütünlük bir enerji iletimi için yeni ve farklı bir çözüm sunmuşlardır. Hem LSG hem de elektriğin uzun mesafede yüksek verimlilikte iletimi için süper iletken teknolojisinin kullanımını araştırmışlardır. Kaya gazı (SG), Dünyanın birçok bölgesinde bulunan önemli bir enerji kaynağıdır. Kaya gazının verimli bir şekilde iletilmesi önemli bir konu haline gelmektedir. Bu bağlamda Çin'e ait Sichuan bölgesinde kriyojenik ve süper iletken teknolojiler kullanılarak sıvılaştırılmış kaya gazı ve elektrik için bütünlük enerji iletiminin teknik ve ekonomik yönünü incelemişlerdir. Tüm sistem, tasarımında malzemenin termodinamik, elektromanyetik ve fizik kurallarına riayet edilerek tasarlanmıştır. Ayrıca sistem için statik ve dinamik detaylı ekonomik analizler yapılmıştır. Çin'in en zengin kaya gazı rezervine sahip eyaleti olan Sichuan Eyaletinde gerçekçi bir bütünlük enerji iletim sistemi çalışması gerçekleştirilmiştir. 5 GW kaya gazı ve 1 GW elektrik iletimi için bütünlük enerji iletim hattının yıllık enerji kapasitesi 8,76 TWh elektrik ve 2.759,4 Mton LSG'ye ulaşmaktadır. Sistemin statik ve dinamik geri ödeme süreleri sırasıyla 9,96 yıl ve 14,46 yıl olarak hesaplanmıştır. Genel olarak hem teknik hem de ekonomik araştırmalar, önerilen uzun mesafe hibrit LSG + elektrik iletimi konseptinin avantajlarını doğruluyor ve hibrit enerji boru hattı için çok disiplinli tasarım rehberliği ve gelecekteki hibrit enerji iletimi için ekonomik değerlendirme konusunda kapsamlı yöntemler sunmuştur.

Chikumoto ve ark. (Chikumoto ve ark., 2023) DC elektrik akımı kullanarak süper iletken kablusunun elektriksel testleri ve akım dağılımını incelemişlerdir. Hokkaido Eastern Iburi de 6.7 büyüklüğünde meydana gelen depremin etkilerinin varlığının/yokluğunun teyit edilmesi ve temel alınması amacıyla Ishikari de bulunan 500 m süper iletken DC iletim sisteminin üçüncü soğutma testi gerçekleştirmişlerdir. Kabloların sağlamlığını kontrol etmek için farklı testler gerçekleştirmişlerdir. Bunlar sırasıyla izolasyon direnci ölçümü, DC dayanım gerilimi, akım yükleme, kapasitans dielektrik kaybı ve teget sıcaklık karakteristik ölçümü'dür. Tüm bu ölçümler, kablo sisteminin özelliklerinin üç termal çevrim sürecinden, altı yıllık sistem kesintisinden ve büyük depremden sonra korunduğunu doğrulamıştır. Sistemin stabilitesi, nominal soğutma koşulunda (TTB = 70 K, LN2 akış hızı 40 L/dak) sürekli akım yükleme testi (5 kA-1 saate kadar) ile kontrol etmişlerdir. Sistem testleri başarıyla tamamlanmış ve sistemin kararlılığı belirlenmiştir.

Endo ve ark. (Endo ve ark., 2021) düşük ısı iletken tabakalı üç eksenli HTS kablunun güç iletim kablo uzunluğunu artırmaya yönelik uygunluğunu incelemişlerdir. Üç eksenli yüksek sıcaklıklı süper iletken (HTS) kablo tasarım kılavuzu oluşturmak noktasında sonlu elemanlar yöntemi programı kullanılarak analitik bir modelleme yapılmıştır. Düşük termal iletken tabakanın (LTCL) takılı konumunun ve kalınlığının AC kaybı, sıcaklık dağılımı ve kablo içindeki maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi araştırmıştır. Analiz sonuçlarına göre AC kaybını ve soğutucu akışkana iletimi azaltmak için LTCL'nin konumunun iletken tabakanın içinde olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Analiz ayrıca, iletken tabakanın iç kısmına 10 mm ila 30 mm kalınlığındaki LTCL'yi sokarak, karada bir soğutma istasyonu tarafından soğutulan 10 km'lik bir HTS kablosu ile uzun mesafeli güç iletimi gerçekleştirme olasılığını da göstermişlerdir. Ayrıca, termal iletimi baskılamanın, AC kaybını azaltmanın ve giriş ısısını artırmanın maksimum sıcaklık üzerindeki etkilerini göz önünde bulundurarak, LTCL kalınlığının artmasının, üç eksenli HTS kablusunun çeşitli uzunluklarında maksimum sıcaklık üzerindeki etkisini açıklamışlardır. Analiz sonuçlarından, termal iletimi baskılamanın etkisi ile giriş ısısını artırmanın etkisi arasında bir değiş tokuş ilişkisi olduğunu bulmuşlardır. Kablodaki maksimum sıcaklığı en aza indirmek için uygun LTCL kalınlığı, dengeleme ilişkisi dikkate alınarak elde etmişlerdir. Bu araştırma Japonya'nın açık deniz rüzgâr enerjisi için faydalı olmuştur.

Chen ve ark. (Chen ve ark., 2021) tokamak uygulamalarında kullanım potansiyeli noktasında 30-m/1-kV/10-kA düşük voltajlı doğru akım (LVDC) süper iletken kablusunun ön tasarımını yapmışlardır. Tasarlanan DC kablunun dış çapı 122,41 mm olup, LN2 (sıvı nitrojenin) iç ve dış kanallardaki basınç düşüşü 6,59 kPa'dır. İç ve dış kanallarının akış hızları sırasıyla 0,5 m/s ve 0,25 m/s'dir. Kablodaki sıcaklık artışı, kablo güvenliği noktasında 5 K'den az olacak şekilde tasarlamışlardır. Birim uzunluk başına ısı kaybı 1,69 W/m'dir,

bu da başlangıç ayar değeri olan 1 W/m'den biraz daha yüksektir. Düşük voltajlı doğru akım kablosu için, bakır katmanın kalınlığı, yalıtım katmanının kalınlığından daha yüksektir. Bunun sebebi geçişler ve arızalar sırasında büyük dalgalanma akımlarına dayanabilmesidir. Yapısal tasarımlar ve performans değerlendirmeleri, pratik tokamak kablo geliştirme ve gösterimi için bazı teknik temeller sağladığını açıklamışlardır.

Dao ve ark. (Dao ve ark., 2019) 300 kW DC endüksiyonlu ısıtıcı için 3 T süper iletken mıknatıs tasarımı ve analizini gerçekleştirmişlerdir. Mıknatıs için 2G HTS ve MgB₂ telleri kullanılmıştır. 2G HTS YBCO telinin ve iki tip MgB₂ telin özellikleri araştırmışlardır ve 3 T mıknatıslar, 300 kW sınıfı DC endüksiyonlu ısıtıcının tasarım özelliklerine göre tasarlandılar. Sonlu elemanlar yöntemi kullanan bilgisayar programı (3D FEM) kullanılarak mıknatısların manyetik alan dağılımları analizler edilmiştir. Üç tür süper iletken tel kullanımı noktasında 3 T mıknatıslar boyutları ve manyetik alanları tespit edildi. Üç tür süper iletken tel için çalışma akımı, sıcaklığı, tel uzunluğu ve toplam tel maliyeti hesaplandı. YBCO telinin uzunluğu 3.4 km ile en düşük seviye olup akımı 520 A'dır. YBCO telini 6,28 km uzunluk ve 430 A akım ile MgB₂ sandviç tipi band takip etmektedir. MgB₂ dairesel tel ise 6.88 km bir uzunluk ve 242 A akım oluşmaktadır. Sıcaklıkları ise sırasıyla 30 K, 10 K ve 10 K olduğunu açıklanmıştır. YBCO telini kullanarak yapılan mıknatıs, MgB₂ tellerinden daha yüksek bir çalışma akımına ve sıcaklığa sahiptir. Maliyetler dikkate alındığında MgB₂ telleri YBCO teline tercih edilebilir. Bu nedenle, MgB₂ tellerini kullanan süper iletken DC endüksiyon ısıtıcıları, YBCO teli kullananlardan daha ekonomik olmaktadır.

Huang ve ark. (Huang ve ark., 2021) dağıtım şebekesinde HTS kablosunu korumak için şönt reaktörlü R-SFCL'nin basitleştirilmiş tasarımını yapmışlardır. HTS (yüksek sıcaklıkta süper iletken) kablosunun Çin'in Shenzhen kentinde güç şebekesinde güvenli çalışmasını sağlamak için, bu makale Matlab/Simulink'te HTS kablosuyla bir dağıtım ağı modelini oluşturmuşlardır. Oluşturdukları modelde arıza süreci için arıza akımı ve ısıl analizler gerçekleştirmişlerdir. Dirençli süper iletken arıza akımı sınırlayıcı (R-SFCL) ve arıza akım sınırlayıcı tasarımını yapmışlardır. HTS'nin termoelektrik kuplaj modeli oluşturmuş ve süper iletken kablonun sıcaklığının 151,7 K'ye kadar çıkabileceğini ortaya koymuşlardır. HTS kablosunu aşırı sıcaklıktan korumak için şönt reaktörlü R-SFCL kavramsal olarak tasarlanmış ve R-Q yöntemi geliştirmişlerdir. R-SFCL modelini oluşturmak için kullanmışlardır. Bu makalenin sonucu şu şekildedir. R-SFCL yardımıyla çeşitli kısa devre arızalarında HTS kablosunun maksimum sıcaklığı 99.7 K'dir. HTS kablosunun açık çevrim çalışma modunda veya kapalı çevrim çalışma modunda güvenli çalışmasını sağlayabilir. Söndürme sırasında R-SFCL'nin maksimum sıcaklığı 185,1 K'ye ulaşır. R-SFCL ayrıca güvenli bir şekilde çalışabilir.

Song ve ark. (Song ve ark., 2020) Çin'in Fuxing eyaletinde yüksek hızlı

trenler için tek fazlı 6,5 MVA/25 kV süper iletken trafosunun tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Şu anda, 3 tondan daha az trafo sistemi ağırlığı, %99'dan daha iyi verimlilik ve %43 kısa devre empedansı hedeflerine ulaşabilen tek fazlı 6,5 MVA süper iletken bir çekiş trafosu inşa etmiştir. Dört tek fazlı 25 kV/1,9 kV HTS sargısından oluşan transformatör motorun çalışmasını sağlamaktadır. Süper iletken 65 K'da çalışmaktadır. Yüksek akımı kontrol etmek ve AC kaybını azaltmak için AG sargılarına Roebel kablosu birleştirmiştir. AC kaybına katkıda bulunan kritik parametreleri tanımlayan 2D FEM (sonlu elemanlar yöntemi) AC kaybı modelleme sonuçları sunulmuştur. 1 m'den uzun sarım uzunluğu, yüksek performanslı Fujikura telleri ve YG ve AG sargılarının sonunda düzenlenen akı saptırıcıların kombinasyonunun, HTS sargılarındaki AC kaybını 2 kW'ın altına indirebileceğini göstermişlerdir. 2,5 kW toplam ısı yükü ve 8 saat sürekli çalışma süresi varsayılarak toplam sistem ağırlığını 3 tonun altında elde edebilen, trafo kriyostatının içine alt soğutucu entegre edilmiş bir açık çevrim soğutma sistemi konseptini sunmuşlardır. Bu tasarım ile %99.5 verim elde edilebilmektedir. Tüm süper iletken trafo sistemi, geleneksel trafolar için ayrılan alana sığabilmektedir.

Sung ve ark. (Sung ve ark., 2013) 10 MW süper iletken rüzgâr enerjisi jeneratörünün ağırlık konusunu dikkate alarak pratik tasarımını yapmışlardır. 10 MW süper iletken senkron jeneratör (SCSG) tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan jeneratörde YBCO ve Bi2223 telleri kullanılarak ağırlık ve hacim optimizasyonu noktasında Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi (3B FEM) kullanılarak manyetik alan dağılımı analiz edilmiştir. YBCO ve Bi2223 tellerinin kullanıldığı jeneratörün ağırlığı sırasıyla 71 ton ve 94 ton olarak hesaplanmıştır. Jeneratör ağırlığının %50 oranında azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Çünkü 10 MW PMSG'nin aktif olmayan ağırlığı SCSG'ninkinden çok daha ağır olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, bu yazıda önerilen yöntemle destek yapısının ağırlığı azaltıldığı için HTS tabanlı rüzgâr enerjisi sisteminin hem mekanik stresinin hem de inşaat maliyetinin azaldığı görülmektedir.

Torrey ve ark. (Torrey ve ark., 2018) elektrikli gemi tahrik sistemi için süper iletken senkron motorlar için çalışma yapmışlardır. Elektrikli gemi tahrik sistemi için hafif, kompakt, yüksek verimli, yüksek güçlü süper iletken bir LTS motor tasarlamışlardır. 36.5 MW gücündeki, 120 dev/dak gemi tahrik motorunun, yapısı itibarıyla biraz dikkate alındığında aktif ağırlığı 43 tondur. Bu, tüm bileşenler hesaba katıldığında (yataklar, toplayıcı halkalar, destek kaidesi, kriyo desteği, vb.) ağırlık yaklaşık %25 artacaktır. Tasarımın ana özellikleri şunları içermektedir. Mekanik hava boşluğu, geleneksel ünitelerde 5 ila 7 mm'ye karşı 10 ila 15 mm arasında nispeten büyük olduğu görülmüştür. Bu, LTS alan bobinleri tarafından oluşturulan geniş alan nedeniyle mümkün olduğu görülmüştür. Daha büyük boşluk, daha düşük sertlik, daha düşük ağırlık yapısı sağlamaktadır. Tüm bobinler için toplam süper iletken

tel uzunluğu yaklaşık 75 kA km'dir. Verimli bir alan bobini tasarımı, bobinlerde 150 A/mm² veya daha fazla akım yoğunluğu gerekli olduğu belirtilmiştir. Her bobin 3 ila 10 km iletken kullanılmıştır.

Hwang ve ark. (Hwang ve ark., 2020) elektrikli araç uygulamaları için akı kontrollü yalıtımsız HTS akı anahtarlama makinesi için çalışmışlardır. Bu yazıda, elektrikli araç uygulamaları için yeni bir akı kontrollü yalıtımsız (NI) HTS akı anahtarlama makinesi (FSM) önerilmiştir. Önerilen makine hem NI HTS alan bobinlerini hem de ek sargıları önemli olduğu belirtilmiştir. Önerilen HTS akı anahtarlama makinesi, NI alan bobinlerini kullanılmış, ancak akı regülasyonu için iyi akı kontrolü sağlayan ek alan sargıları uygulanmıştır. Bir NI HTS alan bobini de imal edilmiş ve test etmişlerdir. NI HTS alan bobininin karakteristik direnci, bobinin bir akım yüklemeye testinden elde etmişlerdir. Karakteristik direnç, NI HTS FSM'nin tasarımında ve karakteristik analizinde kullanılmıştır. NI HTS FSM'nin akı düzenleme performans yeteneklerini analiz etmek için, fabrikasyon NI HTS alan bobininin karakteristik direncine dayalı olarak bir elektrik devresini içeren bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışma, NI HTS FSM'de bile, önerilen yapı aracılığıyla akı düzenleme yeteneklerinin gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Buradaki sonuçlar ayrıca EV uygulamaları için bir prototip NI HTS FSM imalatında yer alanlar için iyi bir referans sağlamaktadır.

Shiohara ve ark. (Shiohara ve ark., 2021) özel bir kimyasal fabrikada üç eksenli süper iletken kablo ile ilgili çalışma yapmışlardır. Özel bir şirketin kimya fabrikasında üç eksenli bir HTS kablunun geniş ölçekli bir tanıtım testi gerçekleştirmişlerdir. 2 ekli 200 m HTS YBCO-CC üç eksenli kablo imal etmişlerdir. Kablo, kriyosoğutmanın neden olduğu termal büzülmeyle başa çıkmak için yılan şeklinde bir düzen ile döşendi ve yerden yaklaşık 5 m yükseklikte bir konuma yerleştirmişlerdir. Kablo, LN₂ sirkülasyonu ile dondurularak soğutmuşlardır. LN₂'yi 5 m yükseltmek için gereken basınç 27,5–33 kPa aralığında ve bu, hesaplanmış 33,6 kPa'lık sonuçla iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir. Kablo sisteminin terminalinde ısı şoku ve LN₂ düşme etkisinden kaynaklanan hasar nedeniyle LN₂ sızıntısı gözlenmiştir. Soğutma hızını kontrol etmişlerdir. Ayrıca 4 K/h'lik bir hedef seviyeye ulaşmışlardır. Bu sonuçlar, LN₂'nin yerden 5 m yukarıya yükseltildiğini ve soğutma hızının kontrolünü ve yönetimini doğruladı. Tesisteki soğuk sistemi kullanarak kriyo soğutma için gerekli enerjiyi ve maliyetleri önemli ölçüde azaltmak gibi pratik uygulamalar için üç eksenli bir YBCO CC kablunun gerçekleştirilmesi için ekonomik zorluklar görülmektedir.

Chen ve ark. (Chen ve ark., 2014) modern güç sistemi ve geleceğin akıllı şebekesi için bütünleşmiş süper iletken manyetik enerji depolama teknolojisi hakkında çalışmışlardır. SMES (süper iletken manyetik enerji depolama) teknolojisi, modern güç sistemlerinde kullanılmak üzere aktif olarak ilerlemiştir. Tek bir SMES sisteminin, küçük ölçekli SMES'lerden ve diğer ticari ESS

(enerji depolama sistemlerinden) oluşan bir HESS (hibrit enerji depolama sisteminin), dağıtılmış bir SMES sisteminin ve dağıtılmış bir HESS'in temel uygulama şemaları sunulmaktadır. SMES tabanlı HESS konsepti, günlük yük dengelemede orta ölçekli SMES sistemlerini ve güç kalitesini iyileştirmede küçük ölçekli SMES sistemlerini uygulamak için ekonomik bir yol sağlar. Süper iletken dc kabloları ve SMES cihazları olan bir dc güç dağıtım ağı durumu, önerilen dört SMES uygulama şemasının performansını değerlendirmek için kavramsal olarak tasarlanmıştır. Sonuçlar, SMES tabanlı DHESS (dağıtılmış hibrit enerji depolama sisteminin) yeni konseptinin özellikle verimli ve ekonomik güç yönetimi elde etmesinin beklenebileceğini göstermektedir. TJ (terajoule) sınıfı bir SMES, günlük yük dengeleme için umut verici bir plan olabilir, ancak daha ekonomik bir HESS planı, 10 GJ sınıfı bir SMES'yi mevcut TJ sınıfı PHS cihazıyla birleştirmektedir. Sermaye maliyeti, TJ-sınıfı SMES'ninkinin yaklaşık onda birine düşürülebilir. Yerel güç kalitesi sorunlarının çözümüne gelince, 10 kJ sınıfı bir SMES, performans açısından MJ sınıfı bir tek SMES ile karşılaştırılabilir bir HESS oluşturmak için MJ sınıfı pillerle birleştirmek için yeterlidir. Hem DSMES hem de HESS'in avantajlarına sahip olan yeni DHESS konsepti, geleceğin akıllı şebekesi için yüksek performanslı ve yüksek ekonomik enerji depolama şeması sağlayacaktır.

3.SONUÇ

Bu çalışmada süper iletken kabloların kullanım alanları ile ilgili literatür araştırması yapılmaktadır. Süper iletkenleri kullanım alanları, yenilenebilir enerji kaynakları, şehir şebeke hatları, metro ve tren hatları, elektrikli uçak, elektrikli araba, LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz) teknolojisi, tokamak uygulamaları ve endüksiyonlu ısıtıcı teknolojisi olduğu görülmektedir. Süper iletken kabloların bu alanlar için avantajlı olduğu görülmektedir. Çeşitli projeleri, önemli bölgelerdeki gerçek elektrik şebekelerine başarılı bir şekilde entegre edilmektedir. Bu projeler tanıtılmaktadır. Son on yılda, süper iletken kablo iletim teknolojisinin araştırma derinliği, olgunluğu ve ticarileştirilmesi önemli ölçüde geliştirilmekte ve teşvik edildiği görülmektedir. Düşük voltajlı, yüksek akımlı ve düşük kayıplı büyük güç kaynağı, potansiyel bir vizyondan gerçeğe dönüşmektedir. Aynı zamanda süper iletken kabloların iletim teknolojisi konusunda ekonomi, güvenilirlik ve kullanım kolaylığı açısından daha fazla çalışma yapılması gerekli olduğu görülmektedir. Süper iletken kabloların güç iletim teknolojisinin geniş ölçekli uygulama hızının kademeli olarak hızlanacağı düşünülmektedir. Bu nedenle geleneksel elektrik enerjisi iletim yöntemlerini ve hatta şebeke mimarisini yeniden şekil verebileceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Chen, X., Jiang, S., Chen, Y., Zou, Z., Shen, B., Lei, Y. ve Gou, H. (2022). Energy-saving superconducting power delivery from renewable energy source to a 100-MW-class data center. *Applied Energy*, 310, 118602. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118602>
- Xie, W., Wei, B. ve Yao, Z. (2020). Introduction of 35 kV km level domestic second generation high temperature superconducting power cable project in Shanghai, China. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 33(7), 1927-1931. <https://doi.org/10.1007/s10948-020-05508-z>
- Sytnikov, V., Kashcheev, A., Dubinin, M., Karpov, V. ve Ryabin, T. (2021). Test results of the full-scale HTS transmission cable line (2,4 km) for the st. Petersburg project. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(5), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3063067>
- Nomura, S., Nitta, T. ve Shintomi, T. (2020). Mobile superconducting magnetic energy storage for on-site estimations of electric power system stability. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), 1-7. <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2982877>
- Masuda, T. ve Mimura, T. (2022). A study on the actual application of superconducting cables to the network. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 32(4), 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3145315>
- Tomita, M., Fukumoto, Y., Kobayashi, Y., Ishihara, A., Akasaka, T., Suzuki, K. ve Onji, T. (2022). Laying of superconducting cable and cooling test on the field of subway. *Cryogenics*, 123, 103433. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103433>
- Zhu, C., Tan, H., Li, Y., Nie, Y. ve Shi, J. Energy efficiency analysis of a liquefied natural gas and electric power combined transmission system (2019). *IEEE Endüstriyel Elektronik ve Uygulamalar Konferansı (ICIEA)* (s. 122-126). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2019.8834234>
- Yamaguchi, S. ve Kanda, M. (2020). A proposal for a lightweight, large current superconducting cable for aviation. *Superconductor Science and Technology*, 34(1), 014001. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abbdc2>
- Zheng, Z., Chen, Y., Chen, X., Shen, B., Xiao, X., Jiang, S. ve Lei, Y. (2023). Hybrid energy transmission for liquefied shale gas and electricity using cryogenic and superconducting technologies: A technical and economic study of Sichuan, China. *Fuel*, 333, 126333. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126333>
- Chikumoto, N., Watanabe, H., Ivanov, Y. V., Hino, T., Okuno, K. ve Inoue, N. (2023). Electrical tests and current distribution of 500-m-long dc superconducting power cable. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 33(5), 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3243538>
- Endo, N., Nagasaki, Y., Miyagi, D. ve Tsuda, M. (2021). Suitable Structure of Triaxial

- HTS Cable With Low Thermal Conductive Layer for Increasing Power Transmission Cable Length. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3125996>
- Chen, Y., Jiang, S., Chen, X., Zheng, P. ve Che, T. (2021). Preliminary design of a superconducting LVDC power cable for tokamak application. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(8), 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3107827>
- Dao, V. Q., Kim, C. S., Lee, C., Choi, J., Park, M. ve Yu, I. K. (2019). Design and comparison analysis of 3 T superconducting magnets using MgB₂ and 2G HTS wires for DC induction heaters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(5), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2897232>
- Huang, H., Tang, Y., Ren, L., Shi, J., Li, J., Xu, Y. ve Wang, Z. (2021). Simplified design of R-SFCL with shunt reactor for protecting HTS cable in distribution network. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(8), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3091075>
- Song, W., Jiang, Z., Staines, M., Badcock, R. A., Wimbush, S. C., Fang, J. ve Zhang, J. (2020). Design of a single-phase 6.5 MVA/25 kV superconducting traction transformer for the Chinese Fuxing high-speed train. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119, 105956. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105956>
- Sung, H. J., Kim, G. H., Kim, K., Jung, S. J., Park, M., Yu, I. K. ve Kim, A. R. (2013). Practical design of a 10 MW superconducting wind power generator considering weight issue. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 23(3), 5201805-5201805. <https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2245175>
- Torrey, D., Parizh, M., Bray, J., Stautner, W., Tapadia, N., Xu, M. ve Zierer, J. (2020). Superconducting synchronous motors for electric ship propulsion. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), 1-8. <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2980844>
- Hwang, Y. J., Jang, J. Y. ve Lee, S. (2020). A Flux-Controllable NI HTS Flux-Switching Machine for Electric Vehicle Applications. *Applied Sciences*, 10(5), 1564. <https://doi.org/10.3390/app10051564>
- Shiohara, K., Sugane, H., Sato, M., Adachi, K., Nakanishi, T., Mido, N. ve Ogawa, M. (2021). Demonstration of a triaxial superconducting cable in a private chemical plant. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(5), 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3065630>
- Chen, X. Y., Jin, J. X., Xin, Y., Shu, B., Tang, C. L., Zhu, Y. P. ve Sun, R. M. (2014). Integrated SMES technology for modern power system and future smart grid. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24(5), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2346502>

Bölüm 3

YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIM KAPLAMALAR

Bekir GÜNEY¹

Mehmet Akif ERDEN²



1 Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Otomotiv Teknolojisi
Programı, Karaman / Türkiye, guneyb@kmu.edu.tr,
ORCID: 0000-0001-9764-9313

2 Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü,
Karabük / Türkiye, makiferden@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1081-4713

GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılacak malzemeler, tasarlanan ve üretilen komponentten beklenen performansı sağlayacak biçimde seçilir. Ayrıca tasarlanan herhangi bir komponent, süreç boyunca farklı şartlara maruz kalabilir. Bu etkileşim, malzemenin ömrünü önemli derecede sınırlayabilir ve hatta özelliklerini artık beklenen talepleri karşılayamayacak kadar değiştirebilir (Tejero-Martin, Rezvani Rad, McDonald, & Hussain, 2019). Bu amaçla, malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek için çok farklı yüzey işlemleri uygulanmaktadır.

Çok çeşitli kaplama yöntemleri ve farklı kimyasal bileşimlerdeki malzemeler kullanılarak, mekanik veya kimyasal hasara maruz kalan komponentlerin özelliklerini geliştirmek için değişik kaplama uygulamaları yapılmaktadır. Bu koruyucu uygulama aynı zamanda, yeni parçaların imalatına ihtiyaç duyulmadığından üretim maliyetini de düşürmektedir. Mevcut kaplama malzemeleri arasında sert metalik alaşımlar, seramikler, polimerler, biyo-camlar ve özel hazırlanmış plastik malzemeler bulunur. Bu malzemeler, fiziksel/kimyasal buhar biriktirme, sol-jel, mikro ark oksidasyonu, elektro-biriktirme ve termal püskürtme teknikleri gibi birçok farklı tekniklerle ana malzeme yüzeyine uygulanmaktadır.

Yüzey kaplamaları, malzeme yüzeyine daha üstün özellikler kazandırmak amacıyla yapılır. Bu sayede alt tabakanın termal, mekanik, elektrik, manyetik, kimyasal, optik veya diğer alanlarda hibrit özellikleri geliştirilir (J. Li, Huang, Meng, & Xie, 2019). Bu işlem yüzey mühendisliği olarak tanımlanır. Bu özellikler, özel bir ısı işlem, kimyasal bir işlem veya özel bir malzeme eklenerek yapılabilir. Kaplamalar tipik olarak atomik boyutlardan milimetrik boyutlara kadar farklı kalınlıklarda uygulanabilir (Murty, Yeh, Ranganathan, & Bhattacharjee, 2019). Yüzey kaplaması saf bir elementin yüzeyde biriktirilmesi ile olabileceği gibi birden çok elementin farklı bileşenlerinin biriktirilmesiyle de yapılabilir.

Saf elementlerin özellikleri kendi başlarına çok düşüktür. Bu elementlerin özelliklerini geliştirmek için ilave elementlerle alaşımlama yaparak, mukavemet ve süneklik gibi özellikleri geliştirilebilir. Alaşımlama, malzemelere istenen özellikleri kazandırmak amacıyla çok eskiden beri yapılmaktadır (George, Raabe, & Ritchie, 2019). Birden fazla elementi birleştiren veya bir metali diğer metalik olmayan elementlerle karıştıran en az biri metal olan ve metalik özellik gösteren karışımlar alaşım olarak tanımlanır. İkili alaşım sistemi iki elementten gelirken üçlü alaşım sistemleri üç alaşımdan meydana gelir. Tabiatta çok bilinen 45 adet metalden, ikili sistem 990 adet üretilirken, üçlü sistem 14000 adet üretilmiştir. Alaşımların çoğu çok sayıda elementten meydana gelir. Kimyasal bileşimde bulunan bir elementin miktarı on bin de bir bile değiştirilse milyonlarca alaşım çeşidi üretmek mümkündür (Savaşkan, 2017).

Alaşım, Hume-Rotary kuralları ile belirlenen, bir çözücü element ana matris içerisinde belirli özellikleri geliştirmek için çeşitli çözünen atomların eklendiği, sistemlerden oluşur. Elektronegatiflik, son yörüngedeki elektron sayıları yani değerlik sayıları, kristal yapılar ve atomik boyut farkları gibi özellikler bu kuralları oluşturur. Bu yüzden geleneksel alaşımlar (TA'lar) genellikle ana matris elementin adıyla (Örneğin; Fe - bazlı alaşımlar, Al - bazlı alaşımlar, Ni - bazlı alaşımlar, Ti - bazlı alaşımlar, Cu - bazlı alaşımlar, Mg - bazlı alaşımlar, v.s.) anılırlar (Yao, Huang, Zhang, Wu, & Xu, 2009). Bu alaşımlar, genellikle bir ana matris element ve onun performansını iyileştirmek için iyi seçilen ilave elementlerden oluşur. Geleneksel alaşım sistemindeki ilave elementler, şekillendirmeyi ve özellikleri iyileştirmek içindir, ancak ilave elementin miktarı sınırlıdır. En yaygın geleneksel alaşım sisteminde atomik içeriğin %50'den fazlası ana matris elementlerinden oluşur. Bu alaşım yapısı, performans özelliklerini sınırlayan önemli bir dezavantaj meydana getirmektedir. Örneğin, en yaygın kullanılan Fe - bazlı alaşımlar, 350-550°C'de temperlendiklerinde sertlik düşerek yüksek sıcaklık performansları kötüleşir (Kim, Warren, & Cantor, 2007). Benzer şekilde Ni - bazlı süper alaşımlarda da aynı problemler görülmektedir (J-W Yeh et al., 2004). Yine aynı gruptan dökme metalik camlar da 400-600°C'de kristalleşmektedir (Greer, 1993). Genel olarak ifade edersek, alaşım elementlerinin sayısındaki ve ilave elementlerin konsantrasyonundaki artış, alaşım sistemini daha kararsız ve kırılğan intermetalik faz oluşturma eğilimine yönlendirir (Ye et al., 2017), bu da alaşım sistemlerinin genel tasarımını bu birincil ana matris elementin özellikleri ile sınırlı kalmasına yol açar (Inoue, 1997).

İyi kombinasyon özelliklerine sahip yenilikçi bir alaşım sistemi, aşırı zorlu şartlar altında hizmet davranışını iyileştirebilir. Bu alaşım sistemi, yukarıda bahsedilen sınırlamayı çözerken (B. Li, Wang, Ren, Yang, & Fu, 2008), ana matris elementlerin %50'den fazla atomik içerikte bulunması gerektiği şeklindeki geleneksel kuralı da ortadan kaldıran yüksek entropili alaşımlar (HEA) sistemini meydana getirmiştir. HEA's'da, alaşımlar çoklu elementlerden oluşmakta ve her biri nispeten yüksek ancak atomik içerikte %35'ten daha az bulunmaktadır. Bu yenilikçi alaşımın özelliklerine, geleneksel alaşımdakinin aksine, çoklu elementlerin birleşik etkisi karar verir. Önceki araştırmalar, yüksek entropi alaşımının düzensiz, hatta nanofaz veya amorf faz gibi basit kristalleşme fazı oluşturma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda, HEA'nın bileşimini kontrol ederek, yüksek sertlik, aşınma direnci, korozyon direnci, oksidasyon direnci, yüksek sıcaklık performansı elde etmek mümkündür (Smith, 1963).

Çok bileşenli alaşımlar kavramı teorik olarak 1788 yılında ünlü metalurjist Franz Karl Achard tarafından ortaya atılmıştır. Aynı zamanda Achard tarafından, demir (Fe), bakır (Cu), bizmut (Bi), kurşun (Pb), kalay (Sn), antimon (Sb), arsenik (As), gümüş (Ag) ve çinko (Zn) olmak üzere 11 elementli farklı

alaşımın üretilmiştir (Cantor, Chang, Knight, & Vincent, 2004). Deneysel imkânların yetersizliğinden dolayı bu kavram 1963 yılında Profesör Cyril Stanley'in (Cai, Wang, Ma, Cao, & Meng, 2019) konuya odaklanmasına kadar birçok araştırmacı tarafından göz ardı edilmiştir. Onların araştırmaları, Profesör Yeh ve Profesör Cantor tarafından bu konuda daha fazla araştırma yapılması için bir temel oluşturmuştur. Bu çok bileşenli alaşımlara 2004 yılında "Yüksek entropili alaşımlar" adıyla yeni bir isim verilmiştir (Choudhuri et al., 2019; Xu, Guo, et al., 2019). Burada yüksek entropi, daha fazla sayıda temel elementin varlığını kastetmektedir. Özet olarak, yüksek entropi etkisiyle malzemenin mikroyapısını sadeleştirerek hacim merkezli kübik yapı (HMK) ve yüzey merkezi kübik (YMK) katı çözeltileri oluşturmaktadır.

Bir ana metalik elemente dayalı alaşımlar, düşük entropili alaşım (LEA), iki ile dört ana elementten oluşan orta entropili alaşımlar (MEA) olarak sınıflandırılmıştır (Jien Wei Yeh, Chen, Lin, & Chen, 2007). Tüm bu tür çok elementli alaşımlarda, alaşım elementleri eşit atomik konsantrasyonlarda mevcut olduğunda konfigürasyonel entropi açıkça maksimize edilir (J-W Yeh et al., 2004); yani, yüksek entropili alaşım (HEA), kabaca eşit oranlarda birden fazla temel elementten oluşan alaşımlar olarak tanımlanır (Gali & George, 2013).

İdeal gazlar, molekül öz hacminin tüm hacminin yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu ve molekülleri arasında itme ve çekme kuvvetleri bulunmayan gazlara (R) olarak bilinir. Bu gazların sabiti, LEA'larda 1 R değerinin altında, MEA'larda 1 R ve 1.5 R arasında, HEA'larda 1.5 R ve üzeri olan alaşımlar olarak belirlenmiştir (Carroll et al., 2015). TA'ların çoğu genellikle LEA olarak bilinir.

TA'lar çözünen maddesi ve çözeltisi arasındaki atomik difüzyonu fark, HEA'larda, artan sayıda ana alaşım elementinin katı çözeltide rastgele karıştırılması nedeniyle oluşmaktadır. Genel olarak, HEA'lardaki tek bir atom veya boşluk, farklı elementel komşulara sahiptir. Bu atomik konfigürasyon, HEA'larda kafes bölgelerindeki lokalize potansiyel enerjiler bakımından TA'lardan daha büyük dalgalanmalara neden olur. Bu sebeple, atomların veya boşlukların yer değiştirmesi, daha büyük lokalize kafes dislokasyonuna yol açar. Sonuçta HEA'lar TA'lardan daha büyük bir atomik göç engeliyle karşılaşır. Bu proses, local kafes potansiyel enerjilerindeki daha büyük dalgalanmaların daha önemli atomik tuzaklara ve engellere yol açması ve bunun da atomik difüzyon için daha yüksek aktivasyon enerjisi ihtiyacı doğurmasıyla açıklanmaktadır. Sonuç olarak, HEA'larda atomik difüzyon, TA'lara kıyasla önemli ölçüde daha yavaştır (K.-Y. Tsai, Tsai, & Yeh, 2013).

HEA'lar, her biri %5 ile %35 arasında eş veya eş atoma yakın atomik konsantrasyona sahip beş veya daha fazla temel elementin, yüksek konfigürasyon entropisi elde etmek için kristal kafes içinde rastgele karıştırılması ile oluşan

katı çözelti alaşım sistemi olarak tanımlanmaktadır. Bu sistem, bir veya iki elemente dayalı geleneksel alaşımlar yerine, yüksek termodinamik entropi, yapısal kafes bozulması, kinetik histerezis-difüzyon etkileri gibi önemli özellikleri barındıran “kokteyl” alaşımların geliştirildiği, önemli avantajlar sunan bir süreçtir (Rong et al., 2022).

Yüksek karıştırma entropisi, intermetalik bileşikler yerine katı çözelti oluşumunu sağlar (Cantor et al., 2004; Murty et al., 2019; Özkan & Karaoğlanlı, 2021; J-W Yeh et al., 2004). Yani, katı çözelti fazlarının yüksek sıcaklıklarda stabilizasyonu, intermetalik bileşiklere göre YMK veya HMK (Miracle, 2017; Y. Zhang et al., 2014) vb. faz yapılarındaki katı çözeltilerin oluşumunu destekleyen daha yüksek konfigürasyonel entropi ve benzer atomik özellikler (atomik yarıçap, değerlik, kristal yapı) (Haas et al., 2018), karıştırma entalpisinin bir kombinasyonu nedeniyle ortaya çıkar (Meghwal et al., 2020). Örneğin; Fe, Co, Ni ve Cr gibi atomik yarıçapı ve elektronegatifliği benzer elementlerin alaşım bileşimlerini ayarlayarak, tek bir FCC yapısında yüksek entropili alaşım üretmek mümkündür (Rong et al., 2022). Bu tür benzersiz termodinamik ve mikroyapısal özellikler HEA’ların, sadece oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklıklarda değil, aynı zamanda kriyojenik sıcaklıklarda da geleneksel malzemelerden daha iyi performans gösteren termal kararlılık, tribolojik, elektrokimyasal (Meghwal et al., 2023), oksidasyon (Lo, Chang, Murakami, Yeh, & Yeh, 2019), korozyon (Shi, Yang, & Liaw, 2017) ve mekanik özellikler sağlar (Gludovatz et al., 2014; Z. Li, Pradeep, Deng, Raabe, & Tasan, 2016; Y. Wang, Li, Ren, Yang, & Fu, 2008; Y. Wu et al., 2014).

Genellikle HEA’ların bu benzersiz özellikleri; (1) yüksek entropili tek veya çift fazlı katı çözelti, (2) yavaş difüzyon, (3) şiddetli kafes bozulması ve (4) kokteyl etkisi gibi dört tipik davranışı ile ilişkilidir (Alptekin, 2023; J.-W. Yeh, 2013). HEA tasarımı ve faz seçimi katı çözelti özelliğini belirlerken yavaş difüzyon, katı çözeltilere nano boyutlu çökeltilerin dahil edilmesiyle, ilave fazların çekirdeklenmesini ve büyümesini engelleyici rol oynar. Nano boyutlu çökeltiler, şiddetli kafes bozulması ve yavaş atomik difüzyon HEA’ların yüksek mekanik mukavemetine pozitif katkı sağlar. İlave olarak kokteyl etkisiyle zenginleşen HEA özellikleri, farklı tasarım ve uygulamalar için tercih edilmesi sağlar (Gong et al., 2023).

Yüksek entropi fazları, yüksek entropi etkisiyle faz diyagramlarındaki eş veya eş atoma yakın alaşım bileşimlerinin intermetalik bileşik fazlarının oluşma eğilimine rağmen bunun yerine katı-çözelti fazlarını stabilize ederek oluşmasını sağlar. Katı çözelti fazı, çözücü ve çözünen elementlerden meydana gelir. HEA’ların eş molar özellikleri çözücü ve çözünenin ayırt edilmesini zorlaştırır. Çok ana elementli alaşımlarda oluşabilecek en yüksek faz sayısından daha az fazın sadece YMK veya HMK katı çözeltilerin basit fazlarını meydana getirebilmektedir. Bileşen sayısındaki artış entropiyi yükseltmektedir (Y. Zhang et al., 2014).

Kafes bölgesindeki distorsiyon etkisi, tek baskın elementin etkisiyle oluşan bileşenlerle karşılaştırılmaktadır. Kimyasal sıralama önemsenmeyen yüksek entropili alaşımlarda elementlerin kafes bölgesindeki rolü benzerdir. Bazı hallerde, ciddi şekilde kafes distorsiyonu elementlerin boyutlarının çok farklı olmasından meydana gelmektedir (Y. Zhang et al., 2014).

Yüksek entropili alaşımların olağanüstü özellikleri, yavaş difüzyon kinetiğine bağlı olarak gelişmektedir. Yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek sıcaklıkta kararlılık ve nanoyapıların oluşması difüzyon hareketi sayesinde gerçekleşmektedir (Tong et al., 2005). Kafes çarpılmalarının atomik hareketleri engellemesi sebebiyle yüksek entropili alaşımlarda difüzyon hızı sınırlıdır (Alptekin, 2023).

Normal şartlarda, metalik alaşımlar için herhangi bir elementin göstermediği özellik, çok sayıda element karıştırılarak, karışım etkisiyle, beklenen özellikler sağlanabilir. Yani, karışım elementleri eklenerek HEA' lara daha üstün özellik kazandırılabilir. Örneğin; Cr elementinin ilave edilmesi, alaşıma üstün korozyon ve mekanik özellikler kazandırabilir. Veya YMK faz yapısındaki Cu ilave edilmesi, alaşımların plastisitesini arttırarak ve büyük hacimli pul parçacıkların meydana gelmesine imkân vererek korozyon ve yüksek sıcaklık mukavemeti arttırabilir (Liu et al., 2021).

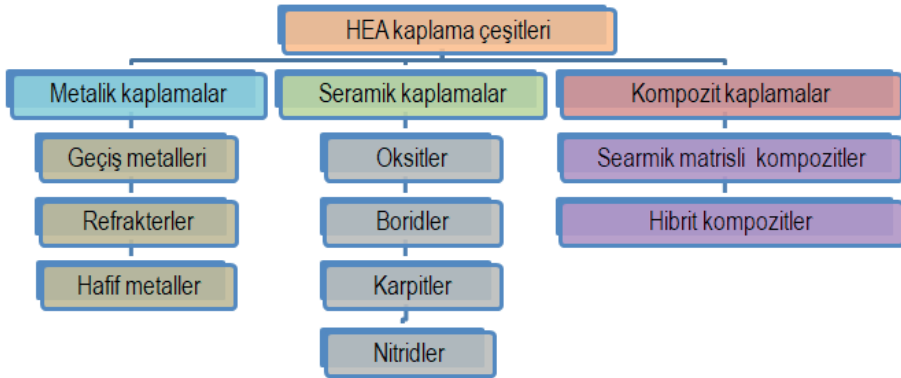
Kimyasal olarak uyumlu, bir ve ya birkaç ana elementin yüksek karışım entropisinin sağladığı avantajla üretilen HEA' lar ez az fazdan ve hatta tek fazdan oluşur. Bu fazlardaki yüksek entropi konsantrasyonu, karşılıklı çözümlenmenin artarak fazların bölünmesi ve intermetalik bileşiklerin meydana gelmesini engeller. Böylece daha mukavemetli ve sade mikroyapıların oluşmasına öncülük eder. HEA' larda bazı elementler arasında kuvvetli afiniteye bağlı olarak intermetalik fazların oluşması kabul edilebilir bir durumdur. Ayrıca, diğer elementlerin çözümlülüğünü intermetalikleri tarafından daha kolay hale getirilir. Bu faktör ana eriyik ve intermetalik bileşiğin çözümlülüğünü arttırmaktadır. Çok elementli eriyik fazlar bu özellik sayesinde meydana gelmektedir. Karışımın entropisi ile entalpisi arasındaki bu ilişki çözümlümlürlük tahmini ve katı eriyiklerin önceden planlanması aşamasında önemli bir belirteçdir (Erdogan & Zeytin; Jien-Wei, 2006; Y. Zhang et al., 2014).

Yüzey, endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerin performansı etkileyen en önemli bileşenidir. Yüzey kaplaması, düşük dayanımlı bir baz alaşımların, çeşitli yüzey modifikasyon teknikleri uygulayarak, ısı yalıtımı, erozyon, korozyon ve mukavemet gibi çeşitli zorlu şartlarda, daha iyi yüzey performansı kazanması için yüzeyin ekonomik olarak değiştirilmesi işlemidir (Evans & Bryan, 1999; Stout, 1998). Malzemelerin yüzey özelliği, performansı ve dayanıklılığı açısından tasarımda göz ardı edilemeyecek derece büyük bir etkiye sahiptir (Ashutosh Sharma, 2021).

HEA'lar ark-ergitme ve döküm (Chen, Feng, & Shen, 2017), lazer kaplama (Y. Zhang & Xing, 2020), eklemeli imalat (Alshataif, Sivasankaran, Al-Mufadi, Alaboodi, & Ammar, 2020) ve mekanik alaşımlama (Benjamin, 1970) gibi tekniklerle üretilmektedir. Bu teknik avantajlar artık termal püskürtme, lazerle kaplama ve püskürtme işlemleri yoluyla kaplamalara dönüştürülebilir.

Hazırlanan HEA kaplamaların korozyon direnci, Co, Ni, Cr, Al ve Mn gibi bazı pasifleştirici elementler eklenerek iyileştirilebilir. Ayrıca, değiştirilmiş elemanların kafes içine girmesinden kaynaklanan kafes distorsiyonu, sertliği ve mukavemeti artırır. Şu anda, HEA kaplamaları hazırlamak için birçok yüzey modifikasyon yöntemi vardır, örneğin, magnetron püskürtme (Dolique, Thomann, Brault, Tessier, & Gillon, 2009; Z. Wu et al., 2014), püskürtme (Yue, Xie, Lin, Yang, & Meng, 2013), lazer kaplama (Ji, Duan, Zhang, & Ma, 2015; Hui Zhang, Wu, He, Li, & Guo, 2016) vb. malzeme bileşimi aynı olsa bile, çeşitli hazırlama işlemleriyle elde edilen kaplama performansı belirgin şekilde farklıdır. Elektro biriktirme yöntemi, alaşım kaplamaları hazırlamak için uygulanabilen düşük maliyetli, basit kullanım, yüksek biriktirme verimliliği ve dost çevre avantajlarına sahiptir (H. Li et al., 2022). Bu nedenle, yüksek entropi alaşımlı kaplamalar, alt tabakanın korozyon direncini ve mekanik özelliklerini geliştirmek için elektro kaplama ile elde edilebilir. Bu çalışmada, ana alaşım sistemleri olarak Fe, Co, Ni, Cr ve Mn/Al kullanılarak elektro-biriktirme yöntemiyle bakır taban üzerinde yüksek entropili alaşım kaplamalar hazırlanmış, yapıları ve özellikleri incelenmiştir (Rong et al., 2022).

HEA kaplamalar, çökeltme sertleşebilirliği, hafiflik, antioksidantlaşma, aşınma ve korozyon direnci vb. özelliklerinden dolayı çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Gludovatz et al., 2014; Todai et al., 2017; Xu, Chen, et al., 2019; Xu et al., 2018). HEA bazlı kaplamalar, alt tabakanın doğasına göre üç sınıfa ayrılır. Bu sınıflandırma, aşağıda daha ayrıntılı olarak ele alınan HEA bazlı metalik kaplamaları, HEA bazlı seramik kaplamaları ve HEA bazlı kompozit kaplamaları içerir. HEA'nın yüzey modifikasyonu ve kaplama işlemlerinin ilerlemesiyle bu sınıflandırmaların geliştirileceği veya değişikliğe tabi olacağı tahmin edilebilir (Ashutosh Sharma, 2021). Bu bilgiler ışığında HEA kaplamaların sınıflandırılması Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. HEA Kaplama Çeşitlerinin Sınıflandırılması (Ashutosh Sharma, 2021).

YÜKSEK ENTROPİLİ KAPLAMA ALAŞIMLARIN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

HEA'ların ilerlemesine bağlı olarak, bu HEA kaplamaların uygulanmasına ilişkin Tablo 2'de verilen üretim yöntemleri; lazer, plazma sprej, buhar biriktirme yöntemleri, toz metalürjisi ve kimyasal bazlı yöntemler olarak sıralanabilir (Ashutosh Sharma, 2021).

Tablo 2. HEA Kaplamaların Üretim Yöntemleri (Ashutosh Sharma, 2021).

Lazer tabanlı yöntemler, hızlı işlem, yüksek ısı girdisi, daha az malzeme israfı ve çevre dostu özellikleri nedeniyle HEA kaplamaları cazip ve popüler hale getirmektedir (Chang, Li, Chiang, & Huang, 2012; Guo, Li, & Liu, 2020; D.-C. Tsai et al., 2013). Bu işlem, substrat ile kaplama malzemesi arasında güçlü bir bağlanma ve homojen bir mikroyapı oluşmasını sağlar. Ayrıca işlemin yüksek ısıtma ve soğutma hızları nedeniyle daha az termal hasar meydana gelir. Lazer yüzey kaplamada yüksek artık gerilmeler, ısıdan etkilenen bölgenin oluşması, HEA kaplamanın ve alt tabakanın elementel seyrelmesi en büyük dezavantajdır (Sangwoo Nam, 2017). HEA'ların üretim süreci, mikroyapılarını önemli ölçüde etkiler. HEA kaplamalarda, lazer kaplama, lazer yüzey ala-

şımlama ve plazma sprej yöntemleri gibi termal maruziyetine bağlı olarak eş eksenli, sütunlu taneler, dendritik ve lamelli yapılar dahil olmak üzere çeşitli mikroyapıların meydana gelmesi muhtemeldir. Kimyasal yöntemlerde, HEA kaplamalar granüler ve küresel şekilli tanecikli yapılara sahiptir (Ashutosh Sharma, 2021).

HEA kaplamalarda yaygın tercih edilen diğer bir işlem de yüksek sıcaklıklarda termal sprej tekniğidir. Termal sprej, toz, tel veya çubuk hammaddesinin bir sprej torcuna beslendiği ve ana metale doğru sprej şeklinde çok yüksek bir hızda ısıtıldığı bir tekniktir. Proses ayrıca uygulanan enerji kaynağına göre üç ana kategoriye ayrılır. Bunlar; (1) yüksek hızlı oksijen yakıt spreji (HVOF); (2) atmosferik plazma spreji (APS), (3) elektrik ark sprej ve gaz genişlemesinden nispeten düşük bir sıcaklıkta meydana gelen soğuk sprej teknikleridir (Herman & Sampath, 1996). Genellikle yüksek aşınma ve oksidasyon direnci (L. Wang, Chen, Yeh, & Ke, 2011) gösteren, termal püskürtme işlemleri enerji kaynağına, püskürtme parçacık boyutuna ve hızına, hammadde malzemelerinin doğasına ve faz bileşimine göre sınıflandırılır (Huang, Yeh, Shun, & Chen, 2004).

HEA kaplamalarda tercih edilen diğer bir önemli yöntemde magnetron sprej tekniğidir. Bu teknikte de, bir vakum odası içindeki iki elektrot arasında bir elektrik alanı üretilir. Genel olarak, inert argon gazı hazneye pompalanır ve elektrik alanın negatif yüklü plakası (katot) ile elektrik alanı kolloidleri nedeniyle pozitif iyonize olur. Ar^+ iyonlarının katot üzerinde bulunan hedeflenen malzeme ile çarpışması, hedef alandan alt tabakaya doğru atomların/moleküllerin (HEA'ları oluşturan elementler) püskürtülmesini sağlar (Frey & Khan, 2015; Velasco, Cavaleiro, & Carvalho, 2016). Püskürtme sistemindeki Ar 'ın hedef malzeme üzerindeki iyonlaşma ve çarpışma oranları, biriktirme oranını ve kaplama kalınlığını belirler. Mıknatısların hedefin altına sokulması, hedef tarafından yayılan ikincil elektronları deşarja hapseden ve Ar gazının iyonlaşmasını artırarak Ar^+ ile hedef malzeme arasındaki çarpışma oranını artıran bir manyetik alan oluşturur. HEA filminin stokiyometrisi, hedef malzemenin kimyasal bileşimi ve çalışma parametreleri değiştirilerek kolayca kontrol edilebilir. HEA nitrür, karbür ve oksit kaplamalar, Ar gazıyla birlikte N_2 , C_2H_2 ve O_2 gazlarının eklenmesiyle kolayca sentezlenebilir (Padamata, Yasinskiy, Yanov, & Saevarsdotir, 2022). Bu teknikte, HEA'lar alt tabaka üzerine atomik olarak katman katman püskürtülerek yapılır. Yüzeyde biriktirilen HEA kaplamaların çoğu, mükemmel aşınma, oksidasyon ve ıslama direnci özelliklerine sahip nitrür, karbür ve borür esaslı HEA kaplamalardır (B. Ren, Shen, & Liu, 2013; D.-C. Tsai et al., 2015; W. Zhang et al., 2018). Çoğu magnetron sprej kaplamalar, diğer termal püskürtmeli kaplamalardan daha yüksek amorf yapılarla birlikte BCC veya FCC katı çözeltili fazlarına sahiptir (Ashutosh Sharma, 2021). Yüksek biriktirme hızı, sıvı fazın tamamen yokluğu ve ısıya duyarlı malzemeler üzerinde birikme olasılığı gibi bir takım

avantajlara sahip olan magnetron püskürtme tekniği, yoğun ince filmlerin üretimi için en çok tercih edilen yöntemlerdendir (Ogneva et al., 2023).

Günümüzde, ana metalin herhangi bir füzyonunu içermeyen toz metalurjisi tekniği de HEA'lar ve HEA bazlı kaplamalar için çok tercih edilen bir metot haline gelmiştir. Bugün, termal, elektrik veya mekanik enerji gibi çeşitli enerji kaynakları kullanılarak çok ince taneli tozlar elde edilebilmektedir (Chen et al., 2017; Tian, Shen, Lu, & Feng, 2019; HX Zhang, Dai, Sun, & Li, 2020).

Bilyalı değirmen, çoğunlukla her türlü metal ve seramiğin öğütülmesinde kullanılan, genellikle yavaş hızda dönen tambur ve sertleştirilmiş paslanmaz çelikten veya titanyadan veya seramikten yapılmış öğütme bilyalarından oluşan genellikle yatay ve silindirik bir makinedir (Alshataif et al., 2020). Geleneksel olarak tozları karıştırmak veya kayaları kırmak için kullanılan mekanik öğütme, toz metalurjisi ve mineral işleme endüstrilerinde de kullanılmaktadır. Burada amaç parçacıkları daha küçük taneli hale getirmektir. İşlemden toz parçacıklarının aşırı plastik deformasyonu ve parçacıklar arasında soğuk kaynak yoktur. Mekanik öğütmede parçaların tane büyüklüğü dışında, özelliklerinde ve mikroyapılarında önemli bir değişiklik meydana gelmez. Ancak, Benjamin vd. (Benjamin, 1970; Benjamin & Volin, 1974), bir nikel veya alüminyum alaşım tozunun oksitleyici bir atmosferde öğütülmesiyle, oksit parçacıkları toz bünyesine daha homojen dağılmasıyla her bir tozun yeni özellikler kazandığını buldular. Bu, öğütme sırasında toz parçacıklarının yüzeyinde oluşan oksit tabakaları aşırı plastik deformasyon sebebiyle kırılarak soğuk kaynak yoluyla katı toz parçacıklarının bünyesine katıldığı fark edilmiştir. Soğuk kaynak yoluyla oluşturulan arayüzler parçacığın ayrılmaz bir parçası haline gelir. Bu öğütme işleminin doğası gereği, başlangıç tozlarından tamamen farklı yeni bir toz malzeme üretilmiş olur (D. Zhang, 2004). Ancak bu değirmenler, nanoyapılı malzemeleri ve HEA tozlarını sentezlemek için kullanılamaz. Yüksek enerjili bilyeli öğütme (HEBM), yöntemi, nano yapıları HEA tozunu sentezlemek için kullanılabilir (Alshataif et al., 2020).

HEBM, ortalama parçacık boyutu 100 nm'den küçük olan, toz halinde nanoyapılı ve homojen malzemeler elde etmek için katı reaksiyonlarda kullanılan karmaşık bir işlemdir. Planet değirmen, verimli ve hassas öğütme için kullanılan yüksek enerjili bilyalı değirmenlerden biridir. Böylece, toz parçacıklarının, çarpışan iki bilye (Maurice & Courtney, 1994) arasındaki çarpışmaları sırasında elastik/plastik deformasyon meydana gelir.

Bu sistemde, devir hızı önemli bir kriterdir. Kristalit/tane/toz partikül boyutlarını azaltmak için tozları karıştırmada, kullanılacak yüksek bir hız yerine daha yavaş bir hızın kullanılması en uygundur. Çünkü, kuru öğütme altında bu işlemin yaygın sınırlamalarından biri, yüksek hıza bağlı

olarak, toz parçacıklarındaki daha fazla yüzey enerjisinden dolayı toz parçacıklarının topaklaşmasıdır. Ancak, günümüzde, topaklanma oluşumu mekanik alaşımlama (MA) ile en aza indirilebilmektedir (Clinktan, Senthil, Ramkumar, Sivasankaran, & Al-Mufadi, 2019). Çok yüksek konfigürasyonlu entropi alaşımları, herhangi bir intermetalik fazlar oluşturmadan saf elementel tozların karıştırılmasından HEBM yoluyla kolayca üretilebilir. İlave olarak HEBM, döküm tekniği/sıvı metalürji tekniği kullanarak zor olan yüksek erime noktalı alaşımları üretmek için kullanılabilir.

Ancak, esas olarak termodinamik ve mekanik yaklaşımlara dayalı olarak mekanik alaşımlamanın modellenmesi üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır (Maurice & Courtney, 1994; Zhao & Shaw, 2017). Bunların arasında, bilyelerin etkileşimlerini ve hareketini, kullanılan gücü, aktarılan enerjiyi, astarın ortamını ve aşınmasını ve değirmen çıktısını tahmin etmede güçlü bir süreç olan ayrık eleman modellemesi (DEM) vardır (Jiang, Trunov, Schoenitz, Dave, & Dreizin, 2009; Yang, Jayasundara, Yu, & Curry, 2006).

HEBM tekniğinin küçük parçacık boyutu, tekdüze atomik dağılım ve basit işlem avantajlarına dayanarak yüksek entropili tozlar üretilebilmektedir (Guan et al., 2020; Guan et al., 2022).

Elektro- biriktirme, bugüne kadar çok az ilgi görmesine rağmen nanokristal HEA'lar elde etmek için etkili bir yöntemdir. Elektro-biriktirme, nanokristal alaşım sentezi için mekanik alaşımlama, yüksek basınçlı burulma ve püskürtme bazlı teknikler gibi en yaygın kullanılan tekniklerle karşılaştırıldığında, nispeten düşük maliyetli ve düşük enerjili bir yöntemdir. Bununla birlikte, bileşenlerin farklı potansiyeli ve elektrolitlerin karmaşıklığı nedeniyle birden fazla elementi aynı anda biriktirmek gerçekten zordur. Ayrıca sıvı hal yöntemlerinden olan elektro-biriktirme, düşük sıcaklıklarda HEA kaplamaların üretilmesi için önemli bir tekniktir (Ashutosh Sharma, Bhattacharya, Das, & Das, 2014; A Sharma, Bhattacharya, Das, & Das, 2016; Ashutosh Sharma, Das, & Das, 2015, 2016; Yan, Zou, & Zhang, 2022).

HEA MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Günümüzde uzay, sağlık savunma ve endüstriyel alanlarda yüksek performans özeliğine sahip, daha ekonomik ve daha pratik yenilikçi malzemelere talep artmış durumdadır. Bu alanlarda kullanılacak malzemelerin ısıl direnç, sürünme direnci, dayanım, aşınma direnci, sertlik, tokluk, süneklik gibi mekanik özellikleri en yüksek seviyede karşılaması gerekir (Miracle et al., 2014). Bugüne kadar, HEA'lar genellikle dentritik yapı ile sonuçlanan (Salishchev et al., 2014), geleneksel metalürji metotlarıyla, örneğin ark eritme veya indüksiyon eritme yoluyla üretilmiştir (Cantor et al., 2004; Jablonski, Licavoli, Gao, & Hawk, 2015; K.-Y. Tsai et al., 2013). Bu yapıyı homojenleştirmek (Jablonski et al., 2015) ve yüksek sertliğine bağlı olarak nihai üretim için işlemek oldukça zordur (Jones, Izzo, Mignanelli, Christofidou, & Stone, 2016; Otto, Hanold,

& George, 2014; Salishchev et al., 2014). Bu nedenle, malzemelerden istenilen performansı elde edebilmek amacıyla farklı üretim teknikleri kullanılmıştır.

Yüksek entropi alaşımlarının hazırlama yöntemleri arasında, sıvı halden dökme eritme ve katılaştırma işlemleri yer alır. Eritme işleminde, katı saf metaller eritilerek sıvı hale getirilir ve homojen bir şekilde karıştırılır. Daha sonra sıvı metallerin karışımı, farklı soğutma şartlarında dökme alaşımlar oluşturmak üzere katılaştırılır. Başka bir yol, toz metalurjisi gibi, katı halden mekanik alaşımlama ile üretim yapmaktır (Y. Zhang & Xing, 2020).

Eritme Yöntemi

Alaşımların ana bileşenlerinin yüksek içeriğinden dolayı, HEA'nın üretimi sırasında elementel ayrışma geleneksel alaşımlardan daha kolay gerçekleşir. Alaşım bileşiminin homojenliğini sağlamak için HEA'ların genellikle birkaç kez eritilmesi gerekir. Ayrıca, bileşenleri oluşturan elementlerin erime noktası farkı, bileşen sayısı arttıkça daha da büyüyecektir. Hazırlama sürecinde farklı elementlerin uygun erime sırası ve ara alaşım seçimi dikkate alınmalıdır (Y. Zhang & Xing, 2020).

Ark Eritme Yöntemi

Bu teknikte, yüksek bir ark sıcaklığı kullanılarak, metaller ısıtılır ve eritilir. Yüksek ark sıcaklığı nedeniyle refrakter HEA'ların hazırlanması uygundur. İlk önce, tasarlanan alaşım bileşimine sahip saf metaller belirlenir ve su soğutmalı bakır potaya konur. Ardından fırın odası vakumlanır. Oda vakumlaması gerekli vakum derecesine ulaştıktan sonra, vakum odasına koruma ve ark başlatma gazı olarak yüksek saflıkta argon gazı doldurulur. Ark tabancası ile bakır pota arasına yüksek voltaj uygulanır, ardından ark şasesi arkı başlatmak için anında bakır potaya temas ettirilir. Ark başlangıcından sonra, atmosferdeki oksijeni emmek için öncelikle yüksek saflıkta argon gazı koruması altında titanyum külçe eritilir. Daha sonra HEA'ları elde etmek için hammadde eritilir ve katılaştırılır. Bazen eritme işlemi sırasında sıvı metali homojen bir şekilde karıştırmak için elektromanyetik karıştırma yapılır (Y. Zhang & Xing, 2020).

İndüksiyonla Eritme Yöntemi

Metallerin yüksek iletkenlik özelliğinden faydalanılarak, metalleri ısıtma ve eritmede indüksiyon akımının kullanılması hızlı ve etkili bir çözümdür. Bu proseste, dış indüksiyon bobini olarak su soğutmalı bir bakır pota metallerde indüklenmiş akım üretmek amacıyla kullanılır. İlk önce, ham saf metaller bir vakum fırını odasındaki bakır potaya yerleştirilir. Yüksek saflıkta argon gazı koruyucu gaz olarak odaya doldurulur. İndüksiyon bobinine elektrik yüklenerek metallerde indüklenen akım üretilir. Joule prensipleri, indüklenen akımın metallerde çok fazla ısı üretilebileceğini açıklar. İkinci olarak alaşım indüksiyonla ısıtılarak eritilir. Aynı zamanda, indüksiyon

elektromanyetik alanının karıştırma etkisi nedeniyle, eritme işlemi sırasında alaşım bileşiminin homojen hale getirilmesinde çok etkilidir. Ark eritme ile karşılaştırıldığında, kütle ağırlığı 1 kg'dan fazla, daha büyük boyutlu numunelerin üretilebilmesi bu yöntemin önemli faydalarından birisidir (Y. Zhang & Xing, 2020).

Katılaştırma Yöntemi

HEA'larda tane büyümesi, sıcaklık alanı ve yerçekimi alanı tarafından katılma sırasında kontrol edilebilir. Katılmanın soğutma hızını ve sıcaklık gradyanını artırmak için bakır kalıp emme dökümü tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik, bakırın iyi ısı iletkenliği nedeniyle geleneksel yöntemlerden daha yüksek bir soğutma hızı sağlayabilir. Bu nedenle, bakır kalıp emme dökümü, soğutma işlemi sırasında kristalleşmeyi sınırlamak için yüksek entropili dökme metal camların imalatına yaygın olarak uygulanır. HEA eriyiği, negatif basınç altında kalıp boşluğuna emilir. Yüksek entropi alaşımlarının çoğunun, yüksek soğutma hızlarında katı çözelti oluşturabilmesi, yüksek karıştırma entropi stabilizasyonuna bağlıdır (Y. Zhang & Xing, 2020).

Ayrıca, eriyiklerin soğutma yönünü kontrol etmek içinde Bridgman yöntemi geliştirilmiştir. Dış yerçekimi alanı, yerçekimi ayrışmasını şiddetlendirilebilir, HEA'larda bileşimsel ve mikroyapısal bir gradyan oluşumunu teşvik edebilir. Bu yöntem, katılma işlemi sırasında ısı akış yönünü, sıcaklık gradyanını ve katı sıvı arayüzünün çekme hızını ayarlayarak, alaşımın yapısını ve özelliklerini iyileştirmek için alaşım kristalinin büyüme yönünü ve oranını kontrol edebilir. Katılma sırasındaki dış yerçekimi alanından yararlanılarak, daha ağır elementler merkezkaç kuvveti etkisiyle işlem sırasında yerçekimi yönü boyunca birikecektir. Sonuç olarak, külçe içinde bir kompozisyon gradyanı oluşur. Bundan sonra, farklı bileşimlerde bir dizi numune elde etmek için alaşım külçeleri yerçekimi yönü boyunca parçalara ayrılır. Tek kristalli alaşım mekanik özelliklerde anizotropik davranır ve motor kanatları için tercih edilirler. Gerçek üretimde kristalli dökümlerin performansını, alaşım bileşimi ve hazırlama süreci gibi ana faktörler belirlemektedir. Polikristalin yüksek entropi alaşımı, mükemmel yüksek sıcaklık özelliklerini, özel bileşim tasarımı sayesinde kazanır. Tek kristal veya sütunlu kristal halinde hazırlanması, yüksek sıcaklık ve manyetik özelliklerini daha da geliştirebilir (Y. Zhang & Xing, 2020).

Eklemeli İmalat Yöntemi

Eklemeli imalat (AM), ekstrüzyon, sinterleme, eritme ve püskürtme yöntemlerini kullanarak katı nesneyi katman katman biriktirerek HEA mühendislik malzemelerini üretiminde kullanılmaktadır. Geleneksel hammadde üretme, kesme, birleştirme ve işleme teknikleriyle kıyaslandığında AM işleme tekniği ile karmaşık üç boyutlu şekilli HEA malzemeler üretilebilir. Ham metaller genellikle AM işlemeden önce hammadde olarak HEA tel veya tozu

olarak önceden alaşımlanır. HEA tozları, çalışma katmanı üzerinde toz yatakları olarak da yayılabilir. Daha sonra besleme stokları, lazer veya elektron ışını gibi yüksek enerji kaynakları tarafından kaynaştırılır. Bu güç kaynakları, refrakter elemanları eritmek için yüksek sıcaklıklara ulaşabilir ve hazırlık süresini büyük ölçüde azaltır. Daha kısa hazırlama süresi, daha düşük erime noktasına sahip elementlerin buharlaşmasını azaltmak için faydalıdır, çünkü artan ana element sayısı ile HEA'nın erime noktası farkı artar. Bu nedenle, lazer metal biriktirme (LMD), seçici lazer eritme (SLM) ve seçici elektron ışını eritme (SEBM), HEA'ları imal etmek için yaygın olarak kullanılan AM teknolojileridir. Öte yandan, seramik tozları gibi sert parçacıklar, HEA kompozitlerini elde etmek için AM sırasında HEA matrisine karıştırılabilir. Bu, nihai parçaların mekanik özelliklerini geliştirmenin iyi bir yoludur (Y. Zhang & Xing, 2020).

Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama (MA), HEA literatüründe köklü bir sentez tekniğidir. Elementel tozlar, yüksek hızlarda dönerken yüksek enerjili darbelere maruz bırakılır, bu da onların tekrarlanan soğuk kaynak ve kırılmalara neden olur. Bu süreç tozların atomik ölçekte karışmalarını sağlar (Suryanarayana, 2001). Bu teknik alaşım oluşumunu sağlarken, alaşım fazı oluşumunun öğütme ortamı, öğütme atmosferi, işlem kontrol değerleri, öğütme süresi ve dönüş hızı gibi bir çok işlem parametrelerine bağlı olduğunu göstermektedir (Vaidya, Muralikrishna, & Murty, 2019).

HEA KAPLAMALARI UYGULAMA TEKNİKLERİ

Buhar Biriktirme

Fiziksel buhar biriktirme ve kimyasal buhar biriktirme dâhil olmak üzere buhar biriktirme teknolojisi, gaz fazındaki alt tabaka üzerine metal, metal olmayan veya bileşik kaplamaların biriktirilmesi işlemi ifade eder. Fiziksel buhar biriktirme teknolojisi temel olarak buharlaştırma kaplama, püskürtme kaplama ve iyon kaplama olarak ikiye ayrılır. Üç yöntem arasındaki fark, atom gazlaştırmadan sonra iyonlaşma derecesinin farklı olmasıdır. Buharlaştırma kaplamasıyla elde edilen buhar atomu iyonlaşma oranı sıfırdır ve iyon kaplamasıyla elde edilen buhar atomu iyonlaşma oranı son derece yüksektir. Püskürtme ile elde edilen buhar atomları sadece kısmen iyonize olur ve magnetron püskürtme en yaygın püskürtme yöntemidir. Bu teknikte, ilk olarak boşluğun içindeki elektrik alanı, büyük miktarda yüksek enerjili Ar⁺ ve elektronlar üreterek Ar atomlarını iyonize etmek için kullanılır ve ardından ön hazırlığı yapılmış numune yüzeyi, elektrik alanının etkisi altında yüksek enerji ile bombalanır. Argon atomlarının E elektrik alanının yüksek ivmesiyle iyonize olarak Ar⁺ katot davranarak yüksek enerji ile HEA kaplamanın numune yüzeyine püskürtülerek transfer olmasını sağlar. Enerji alışverişinden sonra, hedefin yüzeyindeki metal atomik veya iyonik halde numune yü-

zeyinden püskürtülür ve iç manyetik alan atomların yönlü hareket etmesini etkiler ve ardından HEA kaplamasını oluşturur. Devamında, gaz halindeki atomlar ve iyonlar numune yüzeyi üzerinde biriktirilerek HEA film kaplamalar oluşturur. HEA kaplamalar ark eritme veya sinterleme teknikleri ile yapılabilir. HEA filmlerin, birkaç düşük entropili alaşımın birlikte püskürtülmesi ile de elde edilmesi mümkündür. Magnetron püskürtme tekniği hızlı ve kararlıdır. Bu tekniklerde, biriktirme reaktif püskürme şeklinde yapılır. Bu da, püskürtme esnasında argon atmosferine nitrojen, oksijen veya alkan karıştırılarak meydana getirilebilir. Nitrür, oksit veya karbür yüksek entropili seramik filmler hazırlamada önemli alaşımlardır. Magnetron püskürtme teknolojisi ile hazırlanan kaplama, pürüzsüz ve yoğun bir yüzey, düzgün bir bileşim, yüksek esneklik ve kararlı işlem gibi teknik avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, bazı dezavantajları da vardır: yalnızca nano veya mikron düzeyinde filmler oluşturulabilir, kaplama ile altlık arasındaki bağ zayıftır ve hazırlama süreci karmaşıktır. Substrat sıcaklığı, püskürtme gücü, öngerilim gerilimi, hedef taban mesafesi ve güç kaynağı tipi gibi magnetron püskürtme sırasında proses parametreleri, magnetron püskürtme ile hazırlanan kaplamaların mikro yapısını ve özelliklerini etkileyebilir. Bazen biriktirme sıcaklığı ve püskürtme gücü, kaplama kalitesini ve korozyon direncini artırmada daha önemli bir rol oynar (Lin & Yao, 2023; Y. Zhang & Xing, 2020).

Yüzey Kaplaması

Yüzey kaplama, HEA kaplama malzemesini, yüksek enerjili ısıtma kaynağında eriterek substrat yüzeyinde kaplama malzemesi ile metalurjik bir bağ oluşturarak kaplama tabakasının meydana getirilmesi olarak ifade edilir. Isı kaynağına göre, plazma kaplama ve lazer kaplama olarak ikiye ayrılabilir. Ayrıca, kaplama malzemelerinin besleme modlarına göre, önceden ayarlanmış veya eşzamanlı besleme modları da mevcuttur (Y. Zhang & Xing, 2020).

Lazer kaplamada bir atmosfer tarafından korunan toz, önceden hazırlanan ve yüksek derecede aşırı soğutulmuş alt tabaka yüzeyine eşzamanlı olarak püskürtülür. Kaplama kalınlığı mikron mertebesinde ve milimetre kalınlığına kadar farklı aralıklarda ayarlanabilir. Yüksek enerji yoğunluğu, alt tabaka üzerinde minimum termal etki, alt tabakanın düşük seyreltilmesi ve hızlı ısıtma ve soğutma başlıca avantajları olarak sıralanabilir. Oluşturulan yüksek entropili katman, daha az makroskopik ve mikroskobik kusur ile daha düzgün, yoğun bir mikroyapıya sahip olmasıyla, alt tabaka ile sağlam bir metalurjik bağ kurabilir (Hui Zhang, Pan, & He, 2011). Sonuç olarak, lazer kaplama teknolojisi kullanılarak oluşturulan kaplamalar yalnızca HEA malzemelerinin mükemmel niteliklerini içermekle kalmaz, aynı zamanda alt tabaka malzemesiyle güçlü bir bağ kurarak malzemenin mekanik, tribolojik ve korozyon direncini güçlendirir. Yüksek entropili kaplamaların hazırlanma süreci için parametrelerin seçimi, ne kadar iyi performans gösterdiğinin belirlenmesinde malzemenin doğası kadar eşit derecede önemlidir. Genel

olarak, lazer kaplı yüksek entropili kaplamaların mikroyapısını, yüzey morfolojisini ve hizmet ömrünü etkileyen, hazırlık süreci, lazer gücü, lazer tarama hızı, lazer ışını boyutu, toz besleme hızı, yerleştirme öncesi toz kalınlığı, meme açısı ve doldurma mesafesi gibi parametreler ayarlanarak optimize edilebilir. Lazer kaplama ile hazırlanan HEA kaplamalar, homojen olmayan bileşim, gözeneklilik, çatlaklar, inklüzyonlar, yetersiz erime, artık gerilimlerin varlığı ve kaplama ile alt tabaka arasında zayıf bağlanma gibi kusurlar üretebilir (Lin & Yao, 2023).

Elektrokimyasal Biriktirme

Endüstride, demir, nikel, krom, çinko, bakır ve bazı metalik olmayan ikili alaşımlarla elektrokimyasal kaplama tekniği ile uzun zamandan beri işlevsel kaplamalar yapılmaktadır. Şu anda, çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak farklı çözümler üretilmektedir. Bununla birlikte, üçlü ve üzeri alaşımların elektro kimyasal biriktirme teknolojilerinin çoğu hala laboratuvar ortamında yapılabilmektedir. Elektrodepozisyon yoluyla HEA kaplamaları hazırlamanın ana yöntemi, çeşitli iyonları aynı anda çözeltide çözmek için uygun kompleks yapıcı maddeler bulmak ve ardından katodik deşarj yoluyla metal iyonlarını ince filmler halinde biriktirmektir. Elektrodepozisyonla elde edilen filmlerin yoğunluğu ve arayüzey bağlanma enerjisi genellikle magnetron püskürtme ve diğer buhar biriktirme yöntemlerinden daha iyidir (Y. Zhang & Xing, 2020).

HEA KAPLAMALAR ÜZERİNE YAPILAN BAZI ÇALIŞMALAR

Noble vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada (Noble, Radhik, Sathishkumar, & Saleh, 2023), gaz atomizasyon yöntemiyle üretilen AlCoCrFeNi HEA alaşım tozu atmosferik plazma sprey (APS) tekniği kullanılarak 316 çelik alt tabaka numuneye kaplanmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), EDS (Enerji Dağıtıcı x-ışını Spektroskopisi) ve XRD (X-Işını Kırınımı) gibi çeşitli analitik tekniklerle mikroyapı araştırması yapılmıştır. Ek olarak, kaplanmış numunenin mekanik, tribolojik ve korozyon özellikleri, kaplanmamış numuneye göre değerlendirilmiştir. Sentezlenen HEA tozunun mikroyapısal karakterizasyonu, ortalama parçacık boyutu 20 µm olan küresel bir morfolojide olduğu bulunmuştur. Kristal yapının YMK faz yapısında tespit edilmiştir. Kaplanmış numuneler, 150 µm'lik kaplama kalınlığı üzerinde HEA'nın homojen dağılımı ile üniform kaplama meydana getirilmiştir. HEA'nın mükemmel yapışması ve ince dağılımı nedeniyle kaplanmış numuneler mikrosertliği, kaplanmamış numunelere göre 2,46 kat artış göstermiştir. Proses parametreleri değiştirilerek gerçekleştirilen müteakip aşınma testi, kaplanmış numunelerde kaplanmamış numunelere göre geliştirilmiş aşınma direncini ortaya çıkarmıştır. Kaplanmış numunelerin daha düşük yük aralığı, kayma hızı ve kayma mesafesi aşınma direncinde sırasıyla %83.92, %76.56 ve %74.59 artışlar sunmuştur ve aşınmış

yüzeyin karakterizasyonu, mekanizmanın plastik delaminasyon ve yapışkan aşınma olduğunu ortaya koymuştur. Ağırlıkça %3,5 NaCl elektrolitik çözeltisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testi, kaplanmış numunelerin kaplanmamış numunelere kıyasla yüksek korozyon potansiyeline ve düşük akım yoğunluğuna sahip olduğunu göstermiştir. Çelik üzerine HEA ile plazma sprey kaplama, havacılık, petrokimya endüstrisi, madencilik ekipmanı vb. uygulamalara uygun olabilir.

Ren vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada (Z. Ren et al., 2023), Ti-6Al-4V (TC4) titanyum alaşımının yüzeyine lazer tekniği ile NbMoTaWTi refrakter yüksek entropi alaşımları (RHEA) alaşım tozu kaplama yapılmıştır. NbMoTaW RHEA tozu, yeterli alaşımlanmayı sağlamak için eşit molar oranda 45 saat boyunca bilyalı değirmende öğütülerek elde edilmiştir. Bu araştırma, TC4 alaşımının mikrosertliğini ve aşınma direncini artırarak mikro yapısının ve sürtünme özelliklerinin karakterize edilmesi amacıyla yapılmıştır. Kaplama, tek bir HMK fazı sergilemiştir. NbMoTaWTi kaplama, belirgin gözenekler ve çatlaklar olmadan mükemmel yüzey kalitesi sergiledi ve TC4 substratı arasında metalurjik bir bağ oluşturdu. Kaplamanın üst mikro yapısına ince dendritler hâkimdir ve ara yüze yakın alt bölge taç yaprağı benzeri kaba dendritlerden oluşuyordu. Kaplamanın mikrosertliği, alt tabakanınkinden (350 HV) %72 daha yüksek olan 600 HV'ye ulaşmıştır. Kaplamanın aşınma yüzeyi düzdü ve bir miktar abrasif malzemeye yapışmıştır. Kaplamanın özgül aşınma oranı $1,37 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N}\cdot\text{m})$ tespit edilmiştir, bu da alt tabakanınkinden %121,9 oranında daha azdır. Kaplamanın birincil aşınma mekanizmaları oksidatif aşınma ve adhesif aşınmadır mekanizmalarıdır.

Zhu vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada (Zhu et al., 2023), yeterli alaşımlanmayı sağlamak için eşit molar oranda, argon ortamında, 500 dev/dak hızda, 15 saat boyunca bilyalı değirmende öğütülerek elde edilen FeCoCrNiCu_x ve FeCoCrNiSi_x HEA alaşım tozları lazer tekniği kullanılarak SUS304 paslanmaz çelik alt tabaka numuneye kaplanmıştır. FeCoCrNiCu_x ve FeCoCrNiSi_x yüksek entropi alaşım kaplamalarını hazırlamak için lazer kaplama kullanılmış ve aşınma mekanizmalarındaki benzerlik ve farklılıkları bulmak için mikroyapı değişimi ve tribolojik davranışlarındaki farklılıklar araştırılmıştır. Araştırmacılara yüksek entropili alaşım sistemleri için eleman seçiminde bilgi vermek amacıyla, metalik ve metalik olmayan elementlerin yüksek entropili alaşım kaplamaların kalıplama ve tribolojik davranışı üzerindeki kısmi etkileri elde edilmiştir. FeCoCrNiCu_x ve FeCoCrNiSi_x yüksek entropi alaşım kaplamalar, lazer kaplama ile SUS304 paslanmaz çelik alt tabaka üzerinde başarılı bir kaplama meydana getirmiştir. Lazer kaplama ile hazırlanan beş yüksek entropi alaşım kaplamanın tümü tek tip tek bir HMK katı çözelti yapısına sahiptir ve alt tabaka ile iyi bir şekilde birleşir. Cu ilavesi, kaplamanın termal iletim kabiliyetini arttırmıştır, kaplamanın alt tabaka ile metalurjik bağını geliştirmiştir; Si ilavesi ise tane büyüklüğünü

inceltmiştir, ancak kaplamanın kalitesini düşürmüştür. Oda sıcaklığında ve 600 °C'de Si_3N_4 bilyalarına karşı kayan yüksek entropili alaşım kaplamaların tribolojik özellikleri incelenmiştir. Oda sıcaklığında, Cu/Si ilavesi, FeCoCrNi kaplamaların sürtünme katsayısını çok fazla değiştirmemiş ve aşınma direnci, eşit molar doping oranında bir dereceye kadar iyileştirilebilir. FeCoCrNi kaplamaya kıyasla Cu1 ve Si1 kaplamaların aşınma oranları sırasıyla %62,66 ve %69,17 oranında azaltılmıştır. 600 °C'de Cu/Si ilavesinin her ikisi de FeCoCrNi kaplamanın tribolojik özelliklerini iyileştirdi. Si1 kaplama, FeCoCrNi kaplamaya göre 0,19 ile ortalama sürtünme katsayısı ve %81,2 oranında azaltılmış aşınma oranı açısından en iyi performansı göstermiştir. Her kaplama aşınma mekanizması oda sıcaklığında abrasiv aşınmaya, FeCoCrNi, Si0.5, Si1 kaplamalarda plastik deformasyona, Cu0.5, Cu1 kaplamalarda yorulma aşınmasına sahiptir. Yüksek sıcaklıkta, her kaplama esas olarak abrasif aşınma mekanizması ve Cu1 kaplama, yorulma kırılması ve laminer pullanma mekanizması üretmiştir. Yüksek entropi alaşım kaplamalar, paslanmaz çelik alt tabakanın aşınma direncini geliştirmek için büyük bir potansiyel göstermektedir.

Yu vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada (Yu et al., 2023), Q235 çelik yüzeyine lazer tekniği ile yerinde TiC partikülleri ve Mo ile güçlendirilmiş $AlCoCrFeNiMo_x(TiC)_{2-x}$ HEA alaşım tozu kaplama yapılmıştır. $AlCoCrFeNiMo_x(TiC)_{2-x}$ ($x = 0, 0.5, 1, 1.5$ ve 2) HEA tozu, yeterli alaşım olmayı sağlamak için eşit molar oranda 2 saat boyunca bilyalı değirmende karıştırılarak elde edilmiştir. Çalışmada, x'teki değişikliklerin faz, mikroyapı, mikrosertlik, yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci ve korozyon direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kaplamaların mikro yapısı esas olarak BCC fazından meydana gelmiştir. X'teki varyasyon, TiC ye bağlı olarak küresel, çiçeğe benzeyen, dendritik, küçük düzlem eş eksenli kristaller olmak üzere dört morfolojinin meydana gelmesini sağlamıştır. Ayrıca kaplamalarda sırasıyla $x = 1.5$ ve 2 olduğunda σ ve NiCrCoMo fazları ortaya çıkmıştır. Kaplamanın mikrosertliği, difüzyonla güçlendirilmiş katı çözelti kuvvetlendirme ve çökeltme sertleştirme mekanizmalarına atfedilen temel malzemeninkinden 5,58-6,86 kat daha yüksek çıkmıştır. X'in artmasıyla kaplamaların yüksek sıcaklık oksidasyon direnci ve korozyon direnci önce artmış daha sonra azalmış ve $x = 1$ olduğunda en kabul edilebilir değer elde edilmiştir. Uygun miktarda Mo eklenmesi, Al_2O_3 oksit tabakasının oluşumunu teşvik edebilir ve pasivasyon filminin stabilitesini geliştirebilir, böylece kaplamaların yüksek sıcaklık oksidasyon direncini ve korozyon direncini arttırabilir. Ancak TiC, σ ve NiCrCoMo fazları kaplamaların yüksek sıcaklık oksidasyon ve korozyon direncinde azalmaya neden olmuştur.

Silvello vd. (2023) tarafından yapılan çalışmanın amacı (Silvello, Torres Diaz, Rúa Ramirez, & Garcia Cano, 2023), Düşük C ve 316L çelik numune yüzeyine APS ve HVOF teknikleri biriktirilen AlCoCrFeNi kaplamaların

mekanik ve tribolojik özelliklerini araştırmaktır. APS ve HVOF teknikleri, yoğun ve kalın kaplamalar üretmiştir. Her iki kaplamanın da mikroyapısal ve mekanik özellikleri analiz edilerek korozyon direnci ve aşınma davranışı incelenmiştir. APS işleminde, kaplama kalınlığı $430 \pm 24 \mu\text{m}$, $HV_{0.3}$ sertliği 367 ± 22 , gözeneklilik $< \%5$ ve yapışma mukavemeti $61 \pm 3 \text{ MPa}$ olmuştur. Mevcut ana fazlar, düşük miktarda oksit içeren HMK yapıyı tarif etmektedir. Aynı HMK fazları, HVOF kaplamalarda XRD analizi ile tespit edilmiştir ve kalınlık $186 \pm 10 \mu\text{m}$, sertlik $502 \pm 46 HV_{0.3}$, gözeneklilik $< \%2$ ve yapışma kuvveti $15 \pm 1 \text{ MPa}$ olmuştur. Hem APS hem de HVOF kaplamalar, muhtemelen kaplamaların düşük oksit içeriğinden dolayı, her ikisi de 316L performansından uzak olsa bile, C çeliği alt tabakayı $\%3,5 \text{ NaCl}$ 'de korozyona karşı iyi korumuştur. APS kaplamaların disk üzerinde top, lastik tekerlek ve jet erozyon testleri, performansları karşılaştırmak için kullanılan C çeliği ve 316L alt tabakalarından daha yüksek bir kütle kaybı oranı gösterdi. Kaplamanın sertliği $HV_{0.3} 367 \pm 22$ olsa bile, düşük oksit miktarı aşınma direncini iyileştirmedir. HVOF kaplama, kauçuk tekerlek ve jet erozyon testlerinde daha iyi performans sağlar, ancak disk üzerinde top testindeki performansı, aşınma yolunda kalan ve daha sert bir üçüncü gövde görevi gören döküntü nedeniyle daha kötüdür.

Ceritbinmez vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada (Ceritbinmez et al., 2023), vakumlu ark eritme ile üretilen kapsül şeklindeki HfNbTaTiZr RHEA'lar tel elektrik boşaltma işleme (WEDM) kullanılarak kesilmiştir. Milimetrik aralıklarla kesilen kesitlerin alanları görüntü işleme yöntemiyle belirlenmiş, geometrik şeklin yüzey ve mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kesilen malzeme miktarına göre değişen yüzey ve kesit morfolojisi ve yüzey pürüzlülüğü SEM ve EDX ile analiz edilmiş ve olası iyileştirmeler için önerilerde bulunulmuştur. $\% 99.99$ 'un üzerinde saflığa sahip külçelerin eşmolar oranlarının kombinasyonu ile seçilen HfNbTaTiZr RHEA'ları, yüksek saflıkta Ar'de vakum ark eritme işlemi ile eritilip ardından su soğutmalı bakır kalıplara dökülerek hazırlandı. Kimyasal homojenliği sağlamak için numuneler en az beş kez ters çevrilmiş ve yeniden eritilmiştir. Numuneler daha sonra $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 saat tavlansmıştır. RHEA'lar yüksek mukavemete ve sertliğe sahiptir. Ancak oda sıcaklığında sınırlı plastisiteye sahiptir, bu da onları geleneksel teknikler kullanarak işlemeyi ve şekillendirmeyi zorlaştırır. Mevcut çalışmada, HfNbTaTiZr RHEA'lar, sert ve kırılğan malzemelerin yüksek gerilimlere maruz kalmadan hassas şekilde şekillendirilmesini sağlayan tel elektrik boşaltma işleme (WEDM) kullanılarak işlendi. EDS analizleri, RHEA'nın $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 saat tavlamanın ardından kimyasal bileşiminin, $\text{Hf}_{20} \text{Nb}_{20} \text{Ta}_{20} \text{Ti}_{20} \text{Zr}_{20}$ 'nin (atomik oranlar) nominal bileşimine yakın olduğunu gösterdi. XRD analizi, alaşımın tercih edilen (110) oryantasyonlu tek fazlı bir HMK kristal yapısına sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Muhtemelen $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de gerçekleştirilen tavlama işleminden kaynaklanan küçük oksidasyon

(HfO_2 ve ZrO_2) tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü Ra , maruz kalan yüzey alanı yaklaşık $25,2 \text{ mm}^2$ arttıkça yaklaşık $0,75 \text{ }\mu\text{m}$ artmıştır. Bunun nedeni, dielektrik sıvının talaşları uzaklaştırmasının giderek daha zor hale gelmesi olarak kabul edilmiştir. Kesilen yüzeyler üzerinde yapılan SEM görüntüleri ve EDS analizlerinden dielektrik sıvının erime/buharlaştırma aşamasından sonra sağladığı ani soğumanın yüzeyde mikro çatlaklar, boşluklar, globüller, kraterler ve moloz oluşumuna neden olduğu belirlenmiştir. Kesitsel SEM görüntüleri, yüzeydeki mikro çatlakların yaklaşık $30 \text{ }\mu\text{m}$ derinliğinde olduğunu ve ısıdan etkilenen bölgeye (beyaz tabaka ısıdan etkilenen bölge) nüfuz ettiğini ancak iş parçasına doğru daha fazla büyümediğini ortaya çıkarmıştır. Alaşım elementi Hf, Nb, Ta, Ti ve Zr elementlerinin yanı sıra tel elektrottan kaynaklanan kirlenme nedeniyle işlenmiş yüzeylerde Cu ve Zn'nin varlığı da tespit edilmiştir.

Khan vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada (Khan et al., 2020) kaplama işleminin etkisini araştırmak için çeşitli radyo frekansı güçlerinde bir radyo frekansı (RF) magnetron püskürtme tekniği ile $\text{AlCoCrCu}_{0.5}\text{FeNi}$ HEA ile ince film kaplamayı gerçekleştirmiştir. $\text{AlCoCrCu}_{0.5}\text{FeNi}$ 'nin yüksek entropi alaşım (HEA) ince filmlerinin mikro yapısı ve fiziksel özellikleri üzerindeki RF magnetron püskürtmedeki gücün etkisini araştırmak için, filmler 200, 250 ve 300 W'lık üç farklı RF gücünde biriktirilmiştir. Yüzey morfolojisi, bileşimi, mekanik özellikleri, ıslanabilirliği ve özdirenci, püskürtme işleminde kullanılan RF gücünün seçiminden etkilenirken, diğer parametreler sabit tutulmuştur. XRD analizi tüm filmlerin, YMK ve HMK fazlarının bir karışımı ile polikristalin olduğunu ve kristallığın en yüksek seviyelerde kristallığı ve en büyük kristal boyutunu gösteren 300 W biriktirilmiş film ile artan güçle iyileştiğini ortaya çıkarmıştır. Tane sınırları arasındaki amorf fazların varlığı TEM çalışmaları tarafından ortaya çıkarılmıştır ve büyüme sırasında küçük adaların birleştiği, ancak hareketliliğin kristal bölgeleri amorf faz boyunca genişletmek için henüz yeterince yüksek olmadığı 250 W filmler için en yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Kaplamanın ince filmler ve üstün sertlik, yeterli elektriksel iletkenlik, yüksek oksidasyon ve korozyon direnci ile hidrofobiklik gerektiren havacılık kaplamaları gibi uygulamalar için etkileri olan filmlerin fiziksel özelliklerini ayarlamak için kullanılabilir olduğu ön görülmüştür.

Sonuç olarak yüksek entropili kaplamalar, farklı alt tabakanın numunelerin mikroyapı, sürtünme aşınma korozyon ve mekanik özelliklerini geliştirmek için büyük bir potansiyel göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Alptekin, F. (2023). *FeCoCuNiMn Yüksek Entropili Alaşımına Titanyum İlavesinin Elektrokimyasal Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Tranzon/Türkiye.
- Alshataif, Y. A., Sivasankaran, S., Al-Mufadi, F. A., Alaboodi, A. S., & Ammar, H. R. (2020). Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloys: A review. *Metals and Materials International*, 26, 1099-1133.
- Benjamin, J. S. (1970). Dispersion strengthened superalloys by mechanical alloying. *Metallurgical transactions*, 1, 2943-2951.
- Benjamin, J. S., & Volin, T. (1974). The mechanism of mechanical alloying. *Metallurgical transactions*, 5, 1929-1934.
- Cai, Y., Wang, G., Ma, Y., Cao, Z., & Meng, X. (2019). High hardness dual-phase high entropy alloy thin films produced by interface alloying. *Scripta Materialia*, 162, 281-285.
- Cantor, B., Chang, I., Knight, P., & Vincent, A. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 375, 213-218.
- Carroll, R., Lee, C., Tsai, C.-W., Yeh, J.-W., Antonaglia, J., Brinkman, B. A., . . . Liaw, P. K. (2015). Experiments and model for serration statistics in low-entropy, medium-entropy and high-entropy alloys. *Scientific reports*, 5(1), 16997.
- Ceritbinmez, F., Kanca, E., Yünlü, L., Patel, K., Akhtar, M. A., Mukherjee, S., & Günen, A. (2023). Wire electric discharge machining and its effect on the surface finish of HfNbTaTiZr refractory high-entropy alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-9.
- Chang, S.-Y., Li, C.-E., Chiang, S.-C., & Huang, Y.-C. (2012). 4-nm thick multilayer structure of multi-component (AlCrRuTaTiZr) N_x as robust diffusion barrier for Cu interconnects. *Journal of Alloys and Compounds*, 515, 4-7.
- Chen, C., Feng, X., & Shen, Y. (2017). Oxidation behavior of a high Si content Al-Si composite coating fabricated on Ti-6Al-4V substrate by mechanical alloying method. *Journal of Alloys and Compounds*, 701, 27-36.
- Choudhuri, D., Gwalani, B., Gorsse, S., Komarasamy, M., Mantri, S. A., Srinivasan, S. G., . . . Banerjee, R. (2019). Enhancing strength and strain hardenability via deformation twinning in fcc-based high entropy alloys reinforced with intermetallic compounds. *Acta Materialia*, 165, 420-430.
- Clinktan, R., Senthil, V., Ramkumar, K., Sivasankaran, S., & Al-Mufadi, F. A. (2019). Effect of boron carbide nano particles in CuSi₄Zn₁₄ silicone bronze nanocomposites on matrix powder surface morphology and structural evolution via mechanical alloying. *Ceramics International*, 45(3), 3492-3501.

- Dolique, V., Thomann, A.-L., Brault, P., Tessier, Y., & Gillon, P. (2009). Complex structure/composition relationship in thin films of AlCoCrCuFeNi high entropy alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 117(1), 142-147.
- Erdogan, A., & Zeytin, S. Yüksek Entropili Alaşımlar: Prensipler ve Alaşım Tasarımı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1160-1178.
- Evans, C. J., & Bryan, J. B. (1999). “Structured”, “textured” or “engineered” surfaces. *Cirp Annals*, 48(2), 541-556.
- Frey, H., & Khan, H. R. (2015). *Handbook of thin film technology*: Springer.
- Gali, A., & George, E. P. (2013). Tensile properties of high-and medium-entropy alloys. *Intermetallics*, 39, 74-78.
- George, E. P., Raabe, D., & Ritchie, R. O. (2019). High-entropy alloys. *Nature reviews materials*, 4(8), 515-534.
- Gludovatz, B., Hohenwarter, A., Catoor, D., Chang, E. H., George, E. P., & Ritchie, R. O. (2014). A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*, 345(6201), 1153-1158.
- Gong, N., Meng, T. L., Cao, J., Wang, Y., Karyappa, R., Ivan Tan, C. K., . . . Misra, K. P. (2023). Laser-cladding of high entropy alloy coatings: an overview. *Materials Technology*, 38(1), 2151696.
- Greer, A. L. (1993). Confusion by design. *Nature*, 366(6453), 303-304.
- Guan, J., Li, D., Yang, Z., Wang, B., Cai, D., Duan, X., . . . Zhou, Y. (2020). Synthesis and thermal stability of novel high-entropy metal boron carbonitride ceramic powders. *Ceramics International*, 46(17), 26581-26589.
- Guan, J., Liu, Y., Li, D., Yang, Z., Qin, S., Jia, D., & Zhou, Y. (2022). The new complex high-entropy metal boron carbonitride: Microstructure and mechanical properties. *Journal of the American Ceramic Society*, 105(10), 6417-6426.
- Guo, Y., Li, X., & Liu, Q. (2020). A novel biomedical high-entropy alloy and its laser-clad coating designed by a cluster-plus-glue-atom model. *Materials & Design*, 196, 109085.
- Haas, S., Mosbacher, M., Senkov, O. N., Feuerbacher, M., Freudenberger, J., Gezgin, S., . . . Glatzel, U. (2018). Entropy determination of single-phase high entropy alloys with different crystal structures over a wide temperature range. *Entropy*, 20(9), 654.
- Herman, H., & Sampath, S. (1996). Thermal spray coatings. *Metallurgical and ceramic protective coatings*, 261-289.
- Huang, P. K., Yeh, J. W., Shun, T. T., & Chen, S. K. (2004). Multi-principal-element alloys with improved oxidation and wear resistance for thermal spray coating. *Advanced Engineering Materials*, 6(1-2), 74-78.
- Inoue, A. (1997). Bulk amorphous alloys with soft and hard magnetic properties. *Materials Science and Engineering: A*, 226, 357-363.

- Jablonski, P. D., Licavoli, J. J., Gao, M. C., & Hawk, J. A. (2015). Manufacturing of high entropy alloys. *Jom*, 67, 2278-2287.
- Ji, X., Duan, H., Zhang, H., & Ma, J. (2015). Slurry erosion resistance of laser clad NiCoCrFeAl3 high-entropy alloy coatings. *Tribology Transactions*, 58(6), 1119-1123.
- Jiang, X., Trunov, M. A., Schoenitz, M., Dave, R. N., & Dreizin, E. L. (2009). Mechanical alloying and reactive milling in a high energy planetary mill. *Journal of Alloys and Compounds*, 478(1-2), 246-251.
- Jien-Wei, Y. (2006). Recent progress in high entropy alloys. *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 31(6), 633-648.
- Jones, N., Izzo, R., Mignanelli, P., Christofidou, K., & Stone, H. (2016). Phase evolution in an Al0.5CrFeCoNiCu high entropy alloy. *Intermetallics*, 71, 43-50.
- Khan, N. A., Akhavan, B., Zhou, C., Zhou, H., Chang, L., Wang, Y., . . . Liu, Z. (2020). RF magnetron sputtered AlCoCrCu0.5FeNi high entropy alloy (HEA) thin films with tuned microstructure and chemical composition. *Journal of Alloys and Compounds*, 836, 155348.
- Kim, K., Warren, P., & Cantor, B. (2007). Structural relaxation and glass transition behavior of novel (Ti33Zr33Hf33)50(Ni50Cu50)40Al10 alloy developed by equiatomic substitution. *Journal of non-crystalline solids*, 353(32-40), 3338-3341.
- Li, B., Wang, Y., Ren, M., Yang, C., & Fu, H. (2008). Effects of Mn, Ti and V on the microstructure and properties of AlCrFeCoNiCu high entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 498(1-2), 482-486.
- Li, H., Zong, H., Li, S., Jin, S., Chen, Y., Cabral, M. J., . . . Ren, Y. (2022). Uniting tensile ductility with ultrahigh strength via composition undulation. *Nature*, 604(7905), 273-279.
- Li, J., Huang, Y., Meng, X., & Xie, Y. (2019). A review on high entropy alloys coatings: fabrication processes and property assessment. *Advanced Engineering Materials*, 21(8), 1900343.
- Li, Z., Pradeep, K. G., Deng, Y., Raabe, D., & Tasan, C. C. (2016). Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off. *Nature*, 534(7606), 227-230.
- Lin, C., & Yao, Y. (2023). Corrosion-Resistant Coating Based on High-Entropy Alloys. *Metals*, 13(2), 205.
- Liu, X., Duan, Y., Yang, X., Huang, L., Gao, M., & Wang, T. (2021). Enhancement of magnetic properties in FeCoNiCr0.4Cux high entropy alloys through the cocktail effect for megahertz electromagnetic wave absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, 872, 159602.
- Lo, K.-C., Chang, Y.-J., Murakami, H., Yeh, J.-W., & Yeh, A.-C. (2019). An oxidation resistant refractory high entropy alloy protected by CrTaO4-based oxide. *Scientific reports*, 9(1), 7266.
- Maurice, D., & Courtney, T. (1994). Modeling of mechanical alloying: Part I. deforma-

- tion, coalescence, and fragmentation mechanisms. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 25, 147-158.
- Meghwal, A., Anupam, A., Murty, B., Berndt, C. C., Kottada, R. S., & Ang, A. S. M. (2020). Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29, 857-893.
- Meghwal, A., Singh, S., Sridar, S., Xiong, W., Hall, C., Munroe, P., . . . Ang, A. S. M. (2023). Development of composite high entropy-medium entropy alloy coating. *Scripta Materialia*, 222, 115044.
- Miracle, D. B. (2017). High-entropy alloys: A current evaluation of founding ideas and core effects and exploring “nonlinear alloys”. *Jom*, 69(11), 2130-2136.
- Miracle, D. B., Miller, J. D., Senkov, O. N., Woodward, C., Uchic, M. D., & Tiley, J. (2014). Exploration and development of high entropy alloys for structural applications. *Entropy*, 16(1), 494-525.
- Murty, B. S., Yeh, J.-W., Ranganathan, S., & Bhattacharjee, P. (2019). *High-entropy alloys* (Vol. 1). United States: Elsevier.
- Noble, N., Radhik, N., Sathishkumar, M., & Saleh, B. (2023). Characterization and Property Evaluation of High Entropy Alloy Coating on 316 L Steel via Thermal Spray Synthesis. *Tribology International*, 108525.
- Ogneva, T., Ruktuev, A., Cherkasova, N. Y., Malyutina, Y. N., Khomyakov, M., Burov, V., & Bataev, I. (2023). NiAl Coatings Produced by Magnetron Sputtering from Mosaic Targets. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-14.
- Otto, F., Hanold, N. L., & George, E. P. (2014). Microstructural evolution after thermo-mechanical processing in an equiatomic, single-phase CoCrFeMnNi high-entropy alloy with special focus on twin boundaries. *Intermetallics*, 54, 39-48.
- Özkan, D., & Karaoğlanlı, C. (2021). High Entropy Alloys: production, properties and utilization areas. *El-Cezeri*, 8(1), 164-181.
- Padamata, S. K., Yasinskiy, A., Yanov, V., & Saevarsdotir, G. (2022). Magnetron sputtering high-entropy alloy coatings: A mini-review. *Metals*, 12(2), 319.
- Ren, B., Shen, Z., & Liu, Z. (2013). Structure and mechanical properties of multi-element (AlCrMnMoNiZr) N_x coatings by reactive magnetron sputtering. *Journal of Alloys and Compounds*, 560, 171-176.
- Ren, Z., Hu, Y., Tong, Y., Cai, Z., Liu, J., Wang, H., . . . Li, L. (2023). Wear-resistant NbMoTaWTi high entropy alloy coating prepared by laser cladding on TC4 titanium alloy. *Tribology International*, 182, 108366.
- Rong, Z., Wang, C., Wang, Y., Dong, M., You, Y., Wang, J., . . . Zhu, Z. (2022). Microstructure and properties of FeCoNiCrX (XMn, Al) high-entropy alloy coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 921, 166061.
- Salishchev, G., Tikhonovsky, M., Shaysultanov, D., Stepanov, N., Kuznetsov, A., Koldiy, I., . . . Senkov, O. (2014). Effect of Mn and V on structure and mechanical properties of high-entropy alloys based on CoCrFeNi system. *Journal of Alloys and Compounds*, 591, 11-21.

- Sangwoo Nam, C. K., Young-Min Kim. (2017). Recent studies of the laser cladding of high entropy alloys. *Journal of Welding and Joining*, 35(4), 58-66.
- Savaşkan, T. (2017). Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi. *Celpler Matbaacılık*, 347, 350.
- Sharma, A. (2021). High entropy alloy coatings and technology. *Coatings*, 11(4), 372.
- Sharma, A., Bhattacharya, S., Das, S., & Das, K. (2014). A study on the effect of pulse electrodeposition parameters on the morphology of pure tin coatings. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45, 4610-4622.
- Sharma, A., Bhattacharya, S., Das, S., & Das, K. (2016). Fabrication of Sn nanostructures by template assisted pulse electrodeposition. *Surface Engineering*, 32(5), 378-384.
- Sharma, A., Das, S., & Das, K. (2015). Pulse electroplating of ultrafine grained tin coating. *Electroplating of Nanostructures*, 2.
- Sharma, A., Das, S., & Das, K. (2016). *Pulse electrodeposition of lead-free tin-based composites for microelectronic packaging* (Vol. 3): InTech Rijeka, Croatia.
- Shi, Y., Yang, B., & Liaw, P. K. (2017). Corrosion-resistant high-entropy alloys: A review. *Metals*, 7(2), 43.
- Silvello, A., Torres Diaz, E., Rúa Ramirez, E., & Garcia Cano, I. (2023). Microstructural, Mechanical and Wear Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed and High-Velocity Oxy-Fuel AlCoCrFeNi Equiatomic High-Entropy Alloys (HEAs) Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1-18.
- Smith, C. S. (1963). *Four outstanding researches in metallurgical history*: American Society for Testing and Materials.
- Stout, K. (1998). Engineering surfaces—a philosophy of manufacture (a proposal for good manufacturing practice). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 212(3), 169-174.
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in materials science*, 46(1-2), 1-184.
- Tejero-Martin, D., Rezvani Rad, M., McDonald, A., & Hussain, T. (2019). Beyond traditional coatings: a review on thermal-sprayed functional and smart coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28, 598-644.
- Tian, Y., Shen, Y., Lu, C., & Feng, X. (2019). Microstructures and oxidation behavior of Al-CrMnFeCoMoW composite coatings on Ti-6Al-4V alloy substrate via high-energy mechanical alloying method. *Journal of Alloys and Compounds*, 779, 456-465.
- Today, M., Nagase, T., Hori, T., Matsugaki, A., Sekita, A., & Nakano, T. (2017). Novel TiNbTaZrMo high-entropy alloys for metallic biomaterials. *Scripta Materialia*, 129, 65-68.
- Tong, C.-J., Chen, Y.-L., Yeh, J.-W., Lin, S.-J., Chen, S.-K., Shun, T.-T., . . . Chang, S.-Y. (2005). Microstructure characterization of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy

- alloy system with multiprincipal elements. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36, 881-893.
- Tsai, D.-C., Chang, Z.-C., Kuo, L.-Y., Lin, T.-J., Lin, T.-N., & Shieu, F.-S. (2013). Solid solution coating of (TiVCrZrHf) N with unusual structural evolution. *Surface and Coatings Technology*, 217, 84-87.
- Tsai, D.-C., Deng, M.-J., Chang, Z.-C., Kuo, B.-H., Chen, E.-C., Chang, S.-Y., & Shieu, F.-S. (2015). Oxidation resistance and characterization of (AlCrMoTaTi)-Six-N coating deposited via magnetron sputtering. *Journal of Alloys and Compounds*, 647, 179-188.
- Tsai, K.-Y., Tsai, M.-H., & Yeh, J.-W. (2013). Sluggish diffusion in co-cr-fe-mn-ni high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 61(13), 4887-4897.
- Vaidya, M., Muralikrishna, G. M., & Murty, B. S. (2019). High-entropy alloys by mechanical alloying: A review. *Journal of Materials Research*, 34(5), 664-686.
- Velasco, S. C., Cavaleiro, A., & Carvalho, S. (2016). Functional properties of ceramic-Ag nanocomposite coatings produced by magnetron sputtering. *Progress in materials science*, 84, 158-191.
- Wang, L., Chen, C., Yeh, J., & Ke, S. (2011). The microstructure and strengthening mechanism of thermal spray coating NixCo0.6Fe0.2CrySizAlTi0.2 high-entropy alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 126(3), 880-885.
- Wang, Y., Li, B., Ren, M., Yang, C., & Fu, H. (2008). Microstructure and compressive properties of AlCrFeCoNi high entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 491(1-2), 154-158.
- Wu, Y., Cai, Y., Wang, T., Si, J., Zhu, J., Wang, Y., & Hui, X. (2014). A refractory Hf- $\text{Nb}_{25}\text{Ti}_{25}\text{Zr}_{25}$ high-entropy alloy with excellent structural stability and tensile properties. *Materials Letters*, 130, 277-280.
- Wu, Z., Wang, X., Cao, Q., Zhao, G., Li, J., Zhang, D., . . . Jiang, J. (2014). Microstructure characterization of Al_xCo1Cr1Cu1Fe1Ni1 (x= 0 and 2.5) high-entropy alloy films. *Journal of Alloys and Compounds*, 609, 137-142.
- Xu, X., Chen, S., Ren, Y., Hirata, A., Fujita, T., Liaw, P., & Chen, M. (2019). Temperature-dependent compression behavior of an Al0.5CoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Materialia*, 5, 100243.
- Xu, X., Guo, S., Nieh, T., Liu, C., Hirata, A., & Chen, M. (2019). Effects of mixing enthalpy and cooling rate on phase formation of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloys. *Materialia*, 6, 100292.
- Xu, X., Liu, P., Hirata, A., Song, S., Nieh, T., & Chen, M. (2018). Microstructural origins for a strong and ductile Al0.1CoCrFeNi high-entropy alloy with ultrafine grains. *Materialia*, 4, 395-405.
- Yan, X., Zou, Y., & Zhang, Y. (2022). Properties and processing technologies of high-entropy alloys. *Materials Futures*.
- Yang, R., Jayasundara, C., Yu, A., & Curry, D. (2006). DEM simulation of the flow of grinding media in IsaMill. *Minerals Engineering*, 19(10), 984-994.

- Yao, C., Huang, J., Zhang, P., Wu, Y., & Xu, B. (2009). Tempering softening of overlapping zones during multi-track laser quenching for carbon steel and alloy steel. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 30(5), 131-135.
- Ye, Q., Feng, K., Li, Z., Lu, F., Li, R., Huang, J., & Wu, Y. (2017). Microstructure and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy coating. *Applied Surface Science*, 396, 1420-1426.
- Yeh, J.-W. (2013). Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *Jom*, 65, 1759-1771.
- Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., . . . Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299-303.
- Yeh, J. W., Chen, Y. L., Lin, S. J., & Chen, S. K. (2007). *High-entropy alloys—a new era of exploitation*. Paper presented at the Materials science forum.
- Yu, K., Zhao, W., Li, Z., Guo, N., Xiao, G., & Zhang, H. (2023). High-temperature oxidation behavior and corrosion resistance of in-situ TiC and Mo reinforced AlCoCrFeNi-based high entropy alloy coatings by laser cladding. *Ceramics International*, 49(6), 10151-10164.
- Yue, T. M., Xie, H., Lin, X., Yang, H., & Meng, G. (2013). Microstructure of laser re-melted AlCoCrCuFeNi high entropy alloy coatings produced by plasma spraying. *Entropy*, 15(7), 2833-2845.
- Zhang, D. (2004). Processing of advanced materials using high-energy mechanical milling. *Progress in materials science*, 49(3-4), 537-560.
- Zhang, H., Dai, J., Sun, C., & Li, S. (2020). Microstructure and wear resistance of TiAl-NiSiV high-entropy laser cladding coating on Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 282, 116671.
- Zhang, H., Pan, Y., & He, Y.-Z. (2011). Synthesis and characterization of FeCoNiCrCu high-entropy alloy coating by laser cladding. *Materials & Design*, 32(4), 1910-1915.
- Zhang, H., Wu, W., He, Y., Li, M., & Guo, S. (2016). Formation of core-shell structure in high entropy alloy coating by laser cladding. *Applied Surface Science*, 363, 543-547.
- Zhang, W., Tang, R., Yang, Z., Liu, C., Chang, H., Yang, J., . . . Liu, N. (2018). Preparation, structure, and properties of high-entropy alloy multilayer coatings for nuclear fuel cladding: A case study of AlCrMoNbZr/(AlCrMoNbZr) N. *Journal of Nuclear Materials*, 512, 15-24.
- Zhang, Y., & Xing, Q. (2020). High entropy alloys: Manufacturing routes. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands*.
- Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., & Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in ma-*

terials science, 61, 1-93.

Zhao, X., & Shaw, L. (2017). Modeling and analysis of high-energy ball milling through attritors. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48, 4324-4333.

Zhu, Z.-X., Liu, X.-B., Liu, Y.-F., Zhang, S.-Y., Meng, Y., Zhou, H.-B., & Zhang, S.-H. (2023). Effects of Cu/Si on the microstructure and tribological properties of FeCoCrNi high entropy alloy coating by laser cladding. *Wear*, 512, 204533.

Bölüm 4

YAPAY ZEKÂ İLE KALP HASTALIĞINA ETKİSİ OLAN RİSK FAKTÖRLERİNİN ANALİZ EDİLMESİ

Murat TOPALOĞLU¹



¹ Doç. Dr., Trakya Üniversitesi, Keşan Yusuf Çapraz Uygulamalı Bilimler
Yüksekokulu, Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri Bölümü

Giriş

Kalp hastalığı, kalpte meydana gelen bozuklukları kapsayan ve kan dolaşımını etkileyen özel bir durumdur. Kan damarı hastalığından kalp ritmi sorunlarına kadar değişebilir [1]. Sağlık uzmanları, hem hasta geçmişinden hem de kan basıncı, kan şekeri veya kolesterol gibi tıbbi muayenelerden kalp hastalığını teşhis etmektedir. Ayrıca elektrokardiyogram (EKG), egzersiz stres testleri, röntgen, ekokardiyogram, koroner anjiyografi, radyonüklid testleri, MRI ve BT taramaları gibi tıbbi analizler kişinin kalp hastalığı olup olmadığının teşhisine yardımcı olabilmektedir. Kalp hastalığının tespiti ile birlikte uygun tedavinin uygulanması, artan ölüm sayısının önlenmesinde ve kalp hastalığı riskinin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, kalp ile ilgili hastalıklar yılda yaklaşık 17,9 milyon can almakta ve dünyadaki tüm hastalıklar arasında en ölümcül olanlardan olduğu bilinmektedir [2]. Kalp hastalığının erken teşhisi ölüm oranını azaltacağından, birçok araştırmacı konuyu araştırmakta ve çözüm yolları aramaktadır.

Geliştirilmesi oldukça zor olan kalp hastalığının tahminine ve tespitine yönelik yapay zekâ uygulamaları büyük klinik fayda sağlayacaktır. Çoğu ülkede kardiyovasküler uzmanlık eksikliği ve dijital hasta kayıtlarıyla klinik karar vermenin analitik desteğiyle doğru ve verimli erken evre kalp hastalığı tahmini geliştirilerek ele alınabilecek önemli oranda yanlış teşhis edilmiş vaka vardır.

Sağlık sektöründe karar verme sürecine etki sağlayan alanlardan en önemlisi Makine Öğrenimi (ML) teknikleridir. Kalp hastalıklarının doğru tahmininde ML modellerinin performans açısından hala iyileştirmeleri devam etmektedir. Çalışmanın amacı, kalp hastalığının doğru tahmini için yeni bir ML çözümü önermektir. En iyi model performansını sağlamak ve yüksek kaliteli özellikler üretmek için yapay zeka yaklaşımları sunulmaktadır.

Bu sebeplerden dolayı veriyi bilgiye dönüştürme işleminde kullanılan ML teknikleri ile veri setlerini inceleyerek ve analiz ederek bir çıkarım yapma söz konusudur. Çıkarımlar, doktorların yapacağı teşhislere ve uygulayacağı tedavilere yardım sağlamaktadır. ML teknikleri ile yapılan bu çıkarımlar sağlık çalışanlarının yükünü en aza indirmeye çalışmaktadır.

Yapay Zekâ, kalp hastalıklarının tanısında kullanılacak birçok farklı yöntem içermektedir. Bunlar arasında en yaygın olanlar:

1. *Görüntü Analitik Teknikleri:* Yapay zekâ, kalp hastalığı tanısında kullanılan görüntüleri analiz edebilir. Örneğin, elektrokardiyografi (EKG) veya manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi teknikleri kullanarak, kalp hastalıklarının belirtilerini veya riskini belirleyebilmektedir.

2. *Sınıflandırma Algoritmaları:* Yapay zekâ, kalp hastalıklarını tanılamak için sınıflandırma algoritmaları kullanabilir. Bu algoritmalar, veri set-

lerinden öğrenme ve sonrasında yeni verileri kullanarak kalp hastalıklarını tahmin etmeye çalışmaktadır.

3. *Önceden Öğrenme Teknikleri:* Yapay zekâ, kalp hastalıklarının tanısında önceden öğrenme tekniklerini kullanabilir. Bu teknikler, veri setlerinden öğrenir ve sonra yeni verileri kullanarak kalp hastalıklarını tanılamaya çalışır.

4. *Derin Öğrenme:* Yapay zekâ, kalp hastalıklarının tanısında derin öğrenme yöntemlerini kullanabilir. Bu yöntemler, kalp hastalıklarının tanısı için çok sayıda katmanlı yapay sinir ağları kullanır. Bu yapay sinir ağları, veri setlerinden öğrenir ve sonra yeni verileri kullanarak kalp hastalıklarını tanılamaya çalışır.

Son yıllarda yapay zekâ algoritmalarının kalp hastalıklarının teşhisinde önemli sonuçlar elde ettiği gösterilmiştir. Bu teknolojilerin klinik uygulamalarda yaygın olarak kullanılması için daha fazla araştırma ve deneme gerekmektedir. Ancak yapay zekâ teknolojisi kalp hastalıkları teşhisinde önemli fırsatlar sunmaktadır. Yapay zekâ ve alt alanları, hastalıkların erken teşhisinde çok önemli rol oynamaktadır. Gizli örüntüleri tespit ederek yeni bilgiler doğrultusunda çıkarımlar yapmaya odaklanmaktadır.

Yapay zekâ alanındaki son gelişmeler, bir kişiye kalp hastalığı teşhisi konup konmayacağına belirlenmesinde yeni gelişmelere yol açmıştır [3]. Sınıflandırma tekniklerinden biri olarak erken dönemde kalp hastalığı tespiti üzerine makine öğrenimi gerçekleştirmek için denetimli öğrenme teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Klinik ortamlarda, karar vericiler için anlaşılabilirlikleri ve sınıflandırmaya uygunluğu nedeniyle, denetimli öğrenmenin diğer sınıflandırma tekniklere göre güçlü yönleri vardır [5]. Veri miktarının artışı, denetimli öğrenme algoritmalarının başarısını artırmaya neden olacaktır. [6, 7]. Tahmine dayalı farklı uygulama alanlarında yapılan çalışmaların varlığına rağmen, kalp hastalığı konusunda karar vermeyi basitleştirebilecek grafiksel gösterimlerle kural kümelerinin modellenmesi ve çıkarım yapılması konusunda çok az araştırma yapılmıştır.

Kardiyovasküler hastalıklar erken evre tespiti, bu oranları azaltmanın önemli bir yoludur. Bu hastalığın tespiti ve teşhisinin iyileştirilmesine yönelik yapay zekâ alanları kullanılmaktadır. İlişkilendiren bu teknikler, gizli bilginin çıkarılmasına ve veri kümesindeki nitelikler arasındaki ilişkilerin tanımlanmasına izin verir ve kardiyovasküler hastalıklar sınıflandırması için umut verici bir stratejidir [8-11]. Hastalara uygun fiyatlı yüksek kaliteli klinik hizmetlerin sunulması, sağlık kuruluşlarının karşılaştığı kritik bir zorluktur. İyi hizmetin sunulması, yanlış teşhislerden kaçınırken hem hastaların doğru teşhisini hem de etkili tedavinin belirlenmesini gerektirir [12]. Kardiyovasküler hastalıkların erken evre tespiti ayrıca maliyeti en aza indirir ve ölümleri azaltır. ML teknikleri, klinik araştırmalarda kilit rol oynayan bir sınıflandır-

ma algoritması kullanarak işi çok düşük bir maliyetle verimli bir şekilde yapabilir [13]. Burada, bu kadar ucuz ve basit algoritmaların klinik olarak kullanılmak için nasıl yeterli faydaya sahip olabileceği araştırılmış ve iyileştirilmiş hizmetlere giden çözümler geliştirilmiştir.

Yukarıda belirtilen eksiklikleri telafi etmek için, bu çalışma birçok farklı algoritmayı karşılaştırarak en doğru şekilde kalp hastalığını modellemeyi ve tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, 1190 gözlem ve on bir özneliğe sahip kapsamlı bir veri seti kullanılmıştır. İlk olarak, modeli daha doğru ve etkili bir şekilde gerçekleştirmek için veriler ön işleme tabii tutulmuştur. İkinci olarak, hem kalp hastalığını yüksek doğrulukla tahmin etmek hem de incelenen modelin kural çıkarımlarının grafiksel gösterimini ortaya koymak için farklı denetimli öğrenme algoritmaları önerilmiş ve incelenmiştir. Çalışmaların bir çoğundan farklı olarak, bu çalışmanın sonuçları, verilen kural kümeleri ve modelleme sonuçları sayesinde klinik karar destek sistemlerine oldukça kolay bir şekilde entegre edilmesi sağlanacaktır. Genel olarak, bu çalışmanın temeli, kalp hastalığının tanı ve tedavisi üzerinde çalışan sağlık çalışanlarını ve araştırmacıların karar süreçlerini desteklemektir.

Makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi devam edecektir. İkinci bölümde bu alanda yapılan çalışmalara genel bakış yapılacaktır. Veri seti ile denetimli öğrenme algoritmalarının metodolojisi, modellenmesi ve deneysel sonuçları bölüm 3'te açıklanmıştır. Son olarak, bölüm 4 çalışmanın sonucunu ve geleceğe yönelik araştırma önerilerini sunmaktadır.

Literatür Taraması

Araştırmacılar, kalp hastalığının tahmini için bir model oluşturmak üzere birliktelik kuralları, sınıflandırma ve kümeleme gibi farklı ML yöntemlerini uygulamışlardır.

Yapay zekânın hesaplama güvenilirliği, modern çağda tıbbi teşhis ve klinik veri işleme için bir nimet olmuştur. İnsan görüşünün kısıtlandığı yerlerde yapay zekâ genişledi. Şu anda, tıbbi araştırma alanında veri işleme ve yenilik için çeşitli ML algoritmalarını kullanan bir dizi uygulama geliştirilmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar aşağıda incelenmiştir.

Özcan & Peker çalışmalarında kalp hastalıklarını tahmin etmek ve karar kurallarını çıkarmak için denetimli bir makine öğrenme yöntemi olan **CART** (Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı) algoritmasını kullanmıştır. Çalışmanın bulguları, kalp hastalığını etkileyen özelliklerin önemine göre sıralanmaktadır. Çalışmada karar kurallarının, ek bilgiye ihtiyaç duyulmadan klinik amaçlı kullanımı basitleştirebilir. Genel olarak, önerilen algoritma sadece sağlık profesyonellerini değil, kalp hastalığının tanı ve tedavi süreçlerinde maliyet ve zaman kısıtlamalarına maruz kalan hastaları da destekleyebilir. [14]

Ali vd. çalışmalarında, kalp hastalığı teşhisi için en yüksek doğruluğu verecek ML sınıflandırıcılarını belirlemeyi amaçlamıştır. Birkaç denetimli makine öğrenimi algoritması uygulanmış KNN (K-En Yakın Komşu), DT (Karar Ağaçları), RF (Rastgele Orman), MLP (Çok Katmanlı Algılayıcı), LR (Lojistik Regresyon), Adaboost (ABM1) ve kalp hastalığı tahmininde performans ve doğruluk açısından karşılaştırma yapılmıştır. Kalp hastalığında yüksek tahmin verenleri bulmak için tüm özellikler önem puanına göre sıralanmıştır. Bu nedenle, denetimli makine öğrenimi algoritmasının, kalp hastalığı tahminlerini yüksek doğruluk ve potansiyel fayda ile yapmak için kullanılabilirliğini bulmuştur. [15]

Li vd. kalp hastalığını teşhis etmek için makine öğrenimi tekniklerine dayanan verimli ve doğru bir sistem önermeye çalışmıştır. Çalışmada sınıflandırma algoritmaları olarak SVM (Destek Vektör Makineleri), LR, ANN (Yapay Sinir Ağı), KNN, NB (Naive Bayes) ve DT kullanılmıştır [16].

Rani vd. özellik seçimi için yinelemeli özellik eleme ile genetik bir algoritmayı birleştirmiş ve denetimli makine öğrenimi algoritmalarından üretilen hibrit bir sistem önermiştir. Kalp hastalığı tahmin sisteminde en yüksek doğruluğa RF algoritması ile ulaşmıştır [17].

Pathan vd. çalışmasında özellik seçiminin makine öğrenimi tekniklerinin başarısı üzerindeki etkisini araştırmıştır. İki veri seti üzerinde birçok ML algoritmasını çalıştırmıştır. Özellik boyutunu optimize etmenin zaman tüketimini azaltabileceğini ve model performansını artırabileceğini öne sürmüşlerdir [18].

Ripan vd. çalışmasında veri kümelerindeki anomalileri bulmak için K-Means kümeleme yaklaşımından yararlanmıştır. Kümeleme yaparak anomalileri giderdikten sonra; KNN, RF, SVM, NB ve LR algoritmaları ile kalp hastalığı teşhisinde performanslarını gerçekleştirmişlerdir [19].

Yılmaz & Yağın, LR, RF ve SVM yöntemlerinin sınıflandırma çıktıları ölçülmüştür. RF en yüksek doğrulukla koroner kalp hastalığı sınıflandırması yapmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, kabul gören ve uygulanması kolay olan ML algoritmaları arasından en iyi tekniği bulmayı amaçlamış ve önerilen RF algoritmasının bu veri seti için iyi performans gösterdiğini bulmuştur [20].

Doppala vd. tahmin doğruluğunu artırmak için NB, RF, SVM ve XGBoost'u içeren bir ensemble model (topluluk modeli) önermiştir. Üç farklı veri seti üzerinde model doğruluğu ölçülmeye çalışılmıştır [21].

Tiwari vd. çalışmasında bir topluluk modeli incelemiştir. ExtraTrees Classifier, RF, XGBoost ve benzeri birçok ML algoritması kullanan topluluk model sınıflandırıcı bir yaklaşım önermişlerdir [22].

Mienye vd. çalışmasında geliştirilmiş bir ML yaklaşımı ile kalp hastalığı riskinin tahmin modelini uygulamışlardır. Veri kümesi rastgele daha küçük

veri kümelerine bölünmüştür. Ayrıca CART ile modellenmiştir. Daha sonra, weighted aging classifier ensemble (WAE) tarafından çok sayıda CART yaklaşımı ile homojen bir topluluk oluşturulmuştur. Bu yöntem optimum performansın elde edilmesini sağlamıştır. Bu deneysel sonuçlar, Framingham ve Cleveland veri setlerine uygulanmıştır. Sonuçlar, kalp hastalığı riskinin etkili bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermektedir [23].

Javeed vd. verimli özellik seçimi için random search algorithm (RSA) ile yeni bir model geliştirmiştir. Kalp yetmezliği tahmini RF tarafından yapılmıştır. Bu model, ızgara arama algoritmasını (grid search algorithm) kullanarak tahmin modelini optimize etmiştir. Geliştirilen modelin kesinliği, RF modelinin geliştirilmesi ve RSA tabanlı RF gibi iki deneyle değerlendirilmiştir. Bu model Cleveland veri setine uygulanmıştır. Bu yaklaşım, geliştirilmiş doğruluk ve performans ile geleneksel RF sisteminden daha az karmaşık ve verimlidir. Bu yöntem, eğitim doğruluğunu artırırken daha iyi sınıflandırma doğruluğu elde etmiştir [24].

Pan vd. çalışmalarında denetimli ML algoritmalarını karşılaştırmışlardır. Kalp hastalığını tahmin etmek için öğrenme algoritmalarına sahip bir soft voting ensemble mechanism uygulanmıştır. Analizlerde Cleveland kalp hastalığı veri seti kullanılmıştır [25].

Sheeba vd. çalışmalarında yeni bir kalp hastalığı tahmin modeli önermektedir. Önerilen çerçevenin üç ana adımı, özellik çıkarımı (feature extraction), boyut azaltma (dimensionality reduction) ve topluluk tabanlı (optimal ensemble-based) kalp hastalığı tahminidir. NM-PCA tarafından elde edilen boyutsal olarak indirgenmiş özellikler, SVM, RF ve KNN sınıflandırıcıları tarafından eş zamanlı olarak eğitilir. Geliştirilmiş optimize edilmiş RNN (Recurrent Neural Network), nihai tahmin sonucunu üretir. Bu optimize edilmiş RNN, SVM, RF ve KNN'den ilgili çıktılar kullanılarak eğitilir. Son olarak, hem pozitif hem de negatif kriterler kullanılarak, önerilen metodolojinin performansı mevcut metodolojilerle karşılaştırılmıştır [26].

Kumar & Rekha araştırmalarında, öznelik çıkarımı/seçimi ve sınıflandırma süreci için yığılı bir topluluk modeli (stacked ensemble model) önermektedir. Sınıflandırma amaçları ve istifleme modelinin (stacking model) oluşturulması için yeni bir örneğe dayalı Sinir Ağı Akıl Yürütme modeli (Neural Network Reasoning Model) kullanılır. Modelin genel performansı, optimum ve küresel bir çözüm elde etmek için Hawks Optimizer (HO) kullanılarak optimize edilmiştir. Veri setinde karşılaşılan sınıf dengesizliği sorunları da tahmin kalitesini artırmak için çözülmesi gereken temel bir faktör olarak kabul edilir. Mathews Korelasyon Katsayısı (Mathews Correlation Coefficient) (MCC), doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), F-measure vb. gibi bazı performans ölçümleri kullanılmıştır. Beklenen model (anticipated model), mevcut yaklaşımların aksine daha iyi takas (trade-off) sağlar [27].

Dehkordi & Sajedi, amacı bir araştırma merkezi tarafından sağlanan bir veri kümesinde ML yöntemlerini kullanmaktadır. Önerilen yöntem, her hastanın satın aldığı ilaçları (drug) analiz ederek, her hastanın başvurduğu doktor tipini ve muzdarip olduğu hastalık tipini tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Hastalıkları tahmin etmek için farklı veri madenciliği tekniklerinin performansını karşılaştırmak için bir dizi deney yapılmış ve sonuçlar, Yığınlama Modeli'nin (Stacking Model) KNN gibi diğer tekniklere kıyasla daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Stacking, Boosting ve Bagging'e benzer bir ensemble yöntemidir. DT, KNN, SVM, RF algoritmaları base learner, NB ise meta learner olarak kullanılarak prediction yapılmıştır [28].

Terrada vd. çalışmalarında denetimli öğrenme algoritmaları kullanarak tıbbi tanı desteği sistemini ateroskleroz tahmini için oluşturmuşlardır. Cleveland ve Sani Z-Alizadeh veri setlerini kullanmışlardır. ANN, AdaBoost ve DT algoritmaları ile kalp hastalığını teşhis etmek için bir sistem geliştirmişlerdir [29].

Tama vd. kalp hastalığı teşhisi için bir ensemble modeli geliştirmişlerdir. Ensemble modelinin oluşturulmasında RF, gradient boosting machine ve extreme gradient boosting sınıflandırıcıları kullanılmıştır. Z-Alizadeh Sani, Statlog, Cleveland ve Hungarian veri setleri kullanılmıştır [30].

Hasan & Bao, çalışmalarında kalp hastalığı teşhisi için farklı feature selection (filter, wrapper, embedded) algoritmalarını karşılaştırmışlardır. Bu amaca ulaşmak için, yazarlar iki aşamalı bir özellik (feature) alt kümesi (subset) seçme tekniği kullandılar. Uygun tahmin modelini seçmek için veriler üzerinde RF, SVM, K-NN, NB, XGBoost ve MLP modelleri eğitilmiştir. Veri seti Kaggle dan alınan deneysel sonuçlar, wrapper method ile entegre XGBoost sınıflandırıcının kalp hastalığı için en iyi tahmin sonuçlarını sağladığını göstermiştir [31].

Reddy vd. kalp hastalığının minimal niteliklerle sınıflandırılması için farklı sınıflandırıcılar ile karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır. NB, LR, sequential minimal optimization (SMO), RF vb. on farklı ML sınıflandırıcıları, kalp hastalığının doğru tespiti için eğitildi. Optimal attribute alt kümesini elde etmek için Relief, ki-kare ve korelasyon tabanlı özellik alt kümesi değerlendiricisi kullanıldı. Çalışmada Cleveland veri seti kullanılmıştır [32].

Ayon vd. çalışmalarında koroner arter kalp hastalığı tahmini için çeşitli ML algoritmalarını kullanmışlardır. LR, SVM, DNN, DT, NB, RF ve K-NN ile karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Her bir tekniğin performansı, çeşitli değerlendirme teknikleri ile Statlog ve Cleveland kalp hastalığı veri seti kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, en yüksek doğruluk DNN (Deep Neural Network) ile elde edilmiş, hassasiyet ve kesinlik ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada algoritma performansları incelenmiş, kalp hastalığı tahminine odaklanmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır [33].

Doppala vd. çalışmasında özellik seçim mekanizması (feature selection mechanism) kullanarak koroner kalp hastalığının artan doğrulukla saptanması için genetik algoritma ile radyal tabanlı fonksiyon (radial basis function (GA-RBF) kullanan hibrit bir metod oluşturmuşlardır. Cleveland veri seti kullanılarak önerilen sistem performansı, 14 öznitelik kullanılarak elde edilen doğruluk ve önerilen sistemin işlevselliğinin öznitelik azaltımından sonra çok daha iyi performans gösterdiği dokuz öznitelik ile tahmin doğruluğu yükselmiştir [34].

Akella A. & Akella S. koroner arter hastalığı tahmini için 6 farklı ML modeli (LR, DT, RF, SVM, KNN, ANN) üzerinde karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır [35].

Nadeem vd. kalp hastalığı tahmininde iki farklı veri seti kullanarak SVM tabanlı yeni bir yapı sunmuştur. Önerilen model, mevcut modellere kıyasla önemli ölçüde yüksek bir doğruluk elde etmiştir [36].

Katarya & Meena çalışmasında LR, KNN, NB, SVM, ANN, DT, RF, DNN ve MLP algoritmalarını veri setine uygulamışlardır. Cleveland veri seti kullanılarak çeşitli kardiyovasküler hastalık faktörleri göz önünde bulundurulmuş ve çözüme ulaşmak için sınıflandırma matrislerini kullanmışlardır [37].

Asadi vd. çalışmalarında multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) ve RF birleştirilerek, kalp hastalığını tahmin etmek için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Temel amaç, farklı ve doğru karar ağaçları üretmek ve bunların optimal sayısını eş zamanlı olarak belirlemektir. RF kullanılan özellik seçimi, bootstrap ve eğitim setlerinin rastgele seçimi gibi yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar yerine çok amaçlı bir yaklaşım kullanılır. Böylece, her ağacın eğitimi için farklı örnekler ve özellikler içeren farklı eğitim setleri oluşturulur. Önerilen yöntem, altı veri seti üzerindeki performansı bireysel ve topluluk sınıflandırıcılarla karşılaştırılarak araştırmıştır. Sonuçlar, optimal sayıda sınıflandırıcı ile önerilen yöntemin, farklı sınıflandırıcılarla RF algoritmasından daha iyi performans alındığını göstermektedir [38].

Valarmathi & Sheela, çalışmalarında, kalp hastalığını tespit etmek için bir tahmin sistemi önermişlerdir. Veri seti Cleveland ve Z-Alizadeh Sani kullanılmıştır. RF ve XGBoost modelinin performansını optimize etmek için üç hiper parametre optimizasyonu (HPO) tekniği Grid Search, Randomized Search ve Genetic Programming (TPOT Classifier) önerilmiştir. RF ve XGBoost adlı iki modelin performansı mevcut çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Modellerin performansı, Cleveland ve Z-Alizadeh Sani veri kümeleri ile değerlendirilmiştir. TPOT Classifier ile birlikte RF, veri kümesi üzerinde en yüksek doğruluğu elde etmiştir [39].

Dissanayake & Johar çalışmalarında, sınıflandırma algoritmaları kullanılarak oluşturulan modellerin ve çeşitli özellik seçim yaklaşımları kullanıla-

rak performansın deneysel bir değerlendirmesini yapmıştır. Analiz sonuçları için Lasso regresyon, Ridge regresyon ve altı sınıflandırma yaklaşımı (DT, RF, SVM, KNN, LR, GNB) Cleveland kalp hastalığı veri setine uygulanmıştır [40].

Tüm çalışmalar göz önüne alındığında, kalp hastalığı tahmini için önceki çalışmalarda çok çeşitli ML tekniklerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu araştırmada, bundan sonra karmaşık olmayan bir şekilde uygulamaya koyulabilecek sağlık profesyonelleri için yapay zeka sonuçlarını açığa çıkararak bir yaklaşım önermekte ve literatürdeki bu boşluğun doldurulmasını amaçlanmaktadır.

3. Deneysel Sonuçlar

Kardiyovasküler hastalıklar, dünyada ölüm oranlarının en büyük sebebi olarak karşımıza çıkmaktadır. Her hastalık gibi erken ve doğru tedavi ile bu oran düşürülebilmektedir. Hastalığın teşhisinde ve hastaya uygulanacak tedavi süreci içerisinde doğru bir yolun izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Veri madenciliği ve makine öğrenmesi olarak bilinen veriyi bilgiye dönüştürme aşamasında kullanılan teknikler, modeller ve yöntemler ile kalp hastalığındaki risk faktörleri en doğru ve en kısa zamanda bulunmaktadır. Bu bilgiler ışığında ve yapılacak olan çalışmalar ile sağlık çalışanlarına da yardım sağlanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, kalp hastalığındaki risk faktörlerini farklı çalışma ortamlarında, kullanılan modeller içerisinde performans başarımlarını ölçütlerini karşılaştırmaktır. Çalışmanın bu kısmında hazırlanan veri seti içerisinde yapılan değişiklikler ve hazırlanma süreci aşama aşama gösterilmektedir. Veri kümesi üzerine uygulanan modellerin karmaşıklık matrisleri ve metrikleri incelenmiştir.

3.1. Veri Toplama

Bu çalışmada, modelimizi tasarlamak için bir kalp hastalığı veri seti işlendi. Veri seti Kaggle'dan [41] elde edilmiştir. Bu veri kümesinde 14 öznitelik vardır. Tablo 1, tüm özelliklerin ayrıntılarını göstermektedir. Veri setinde farklı yaşlarda 713 erkek ve 312 kadın olmak üzere 1025 hasta kaydı bulunmakta olup bunların 499'u (%48,68) normal, 526 (%51,32) kalp hastasıdır. Kalp hastalığı olan hastaların 300'ü (%57,03) erkek, 226'sı (%42,97) kadındır.

Tablo - 1 Veri Seti Öz nitelik Ayrıntıları

SN	Öz nitelik Adı	Açıklama
1	Yaş (age)	Yıl olarak yaş
2	Cinsiyet (sex)	Erkek = 1; Kadın = 0
3	Cp	Göğüs ağrısı tipi (4 değer)
4	Trestbps	Dinlenme kan basıncı (Hastaneye yatışta Hg mm cinsinden)
5	Chol	Kolesterol (mg/dl)
6	Fbs	Açlık kan şekeri > 120 mg/dl (1 = true; 0 = false)
7	Restecg	Dinlenme elektrokardiyogram sonuçları
8	Thalach	Maksimum kalp atış hızı
9	Exang	Egzersize bağlı anjina (1 = yes; 0 = no)
10	Oldpeak	Dinlenmeye dayalı egzersiz tarafından uyarılmış ST depresyon değişkeni
11	Slope	Egzersiz zirvesinde ST segment eğimi
12	Ca	Floroskopi ile renklendirilen ana damarların sayısı (0-3)
13	Thal	1 = normal; 2 = fixed defect; 3 = reversible defect
14	Hedef (target)	0 = hasta değil ve 1 = hasta

3.2. Veri Ön işleme

Çalışmayı yürütmek için bir veri madenciliği aracı, keşifsel veri analizi (EDA) ve görselleştirme için Python sürüm 3.11.2'i kullanıldı. Bir makine öğrenimi metodolojisinin performansı, veri kümesinin ne kadar iyi hazırlandığına ve yapılandırıldığına bağlı olduğundan, herhangi bir makine öğrenimi yaklaşımı için veri ön işleme zorunludur. Kayıp değerleri işlemek için filtre uygulanmış, ardından ön işleme aşamasında aykırı ve aşırı değerleri tespit etmek için Interquartile Range (IQR) olarak bilinen başka bir filtre uygulanmıştır. IQR, bir veri kümesinin medyanı hakkındaki değişkenliği ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Aykırı değer, verilerin beklenen aralığının dışında kalan bir veri noktasıdır ve analiz amaçları için kayıt hataları veya diğer alakasız olaylardan kaynaklandığı varsayılabilir [42]. Makine öğrenimi (ML) yöntemleri [43] için, daha iyi bir analitik veya istatistiksel sonuç elde etmek için bu tür aykırı değerleri kaldırmak önemlidir. Aykırı değer tespiti için veriler üç çeyreğe, Q3, Q2 ve Q1'e bölünür. Burada Q1 ve Q3 verinin sınırlarıdır.

IQR değeri $IQR = Q3 - Q1$ formülü ile daha sonra alt sınır (BL) ve üst sınır (BU) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır [44]:

$$BL = Q1 - 1,5 * IQR \quad (1)$$

$$BU = Q3 + 1,5 * IQR \quad (2)$$

Burada, BL'den düşük ve BU'dan büyük bir sonuç aykırı değer olarak kabul edilir. Bu nedenle, veri setinin aykırı değerler içermediğini doğrulamak için bazı keşifsel veri analizleri yapılmış ve özellikler arasındaki korelasyonları saptamak için veriler IQR ve ısı haritası olarak temsil edilmiştir.

3.3. Performans Değerlendirme Metrikleri

Doğruluğu ve diğer istatistiksel değişkenleri 10 kat çapraz doğrulama ile karşılaştıran en iyi performans gösteren algoritmayı bulmak için veri kümesine dokuz sınıflandırma algoritması uygulanmıştır. Uygulanan algoritmalar, çok katmanlı algılayıcı (MLP Classifier), K-en yakın komşu (KNN), rastgele orman (RF), karar ağacı (DT), lojistik regresyon (LR), Gaussian Naive Bayes (NB), Destek Vektör Makineleri (SVM), Gradient Boosting Classifier ve AdaBoostClassifier'dır. Bu algoritmalar, performans değerlendirme ölçütlerine göre karşılaştırılmıştır. Bu performans değerlendirmelerine ait açıklamalar şu şekildedir.

Her algoritma için sonucun duyarlılığını (sensitivity & recall), özgüllüğünü (specificity) ve doğruluğunu (accuracy) hesaplamak için bir karmaşıklık matrisi elde edilmiştir. Tüm parametrelerin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmıştır [45 - 47]:

Doğruluk (Accuracy):	$(TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$	(1)
Duyarlılık (Sensitivity & Recall):	$TP / (TP + FN)$	(2)
Özgüllük (Specificity):	$TN / (TN + FP)$	(3)
Kesinlik (Precision):	$TP / (TP + FP)$	(4)
Doğru / Pozitif Oranı (TPR):	$TP / (TP + FN)$	(5)
Yanlış / Pozitif Oranı (FPR):	$FP / (FP + TN)$	(6)

Burada, **TP** ve **TN** sırasıyla doğru pozitif ve doğru negatifi temsil eder ve **FP** ve **FN** yanlış pozitif ve yanlış negatifi gösterir; **TPR** ve **FPR** yanlış pozitif oranı temsil eder. **Duyarlılık**, sınıflandırıcının doğru bir şekilde veri olarak tanımladığı gerçek pozitiflerin yüzdesiyle ilgilidir ve sınıflandırıcının doğru bir şekilde tanımladığı pozitif tahminlerin sayısını yansıtır [48]. **Özgüllük**, sınıflandırıcının olumsuz sonuçları doğru bir şekilde ayırt etme yeteneğidir [48]. **Doğruluk**, bir sınıflandırıcı tarafından doğru sınıflandırılan örneklerin yüzdesidir [45, 47, 48].

Hata Oranı (Misclassification Rate), sınıflayıcının yanlış tahmin performansını ölçmektedir. **Kesinlik**, Sınıflayıcının gerçek pozitif değeri tahmin ettiği bir ölçüdür. Modelin başarılı sayılması için mümkün oldukça yüksek bir sonuç çıkmalıdır [48, 49]. **F-Ölçütü (F-Measure)**, sınıflandırıcının performansını ölçmektedir. Verilere uygun modellerin karşılaştırılmasında kullanılmaktadır. **ROC Eğrisi (ROC Curve) ve AUC (Area Under The Curve)**: ROC (Receiver Operating Characteristic) analizi 2. Dünya Savaşı zamanlarında Britanya'da radarlarda tespit edilen sinyallerin doğruluğunda kullanılmıştır. 1969 yılında Lusted, bu analizi tıpta karar vermede kullanmayı önermiştir. Testlerin performanslarını belirlemede, lojistik modeller ve istatistiksel modellerin doğruluğu gibi birçok araştırma alanında kullanılmaktadır. AUC - ROC eğrisi, çeşitli eşik ayarlarında sınıflandırma problemleri için bir performans ölçümüdür. ROC-AUC ölçüsü ise ROC eğrisinin altında kalan

alanı temsil etmektedir. ROC, olasılık eğrisidir. AUC ise ayrılabilme derecesini veya ölçüsünü temsil eder. Modelin sınıfları ne kadar ayırt edebildiğini söyler. AUC ne kadar yüksekse, model 0 sınıfını 0 ve 1 sınıfını 1 olarak tahmin etmede o kadar iyidir. Benzer şekilde, AUC ne kadar yüksekse, model hastalığı olan ve olmayan hastaları ayırt etmede o kadar iyidir. **MCC (Matthew's Correlation Coefficient)**, model değerlendirmesi için kullanılan istatistiksel bir araçtır. Karmaşıklık matrisini veya bir hata matrisini özetlemeye yardımcı olan en iyi tek değerli sınıflandırma metriğidir. **Cohen's Kappa**, bir sınıflandırma probleminde iki açıklayıcı arasındaki anlaşma düzeyini ifade eden bir puan olan istatistiksel bir ölçümdür. Puanlayıcılar arasında güvenilirlik belirlemede sıklıkla kullanılmaktadır. Kappa istatistiği -1 ile +1 arasında yer almaktadır. Puanlamada kullanılan kategorilerin birbirinden bağımsızdır. Formülde görülen hesaplama ile kappa istatistiği (K) yapılmaktadır [49].

Kappa:	$(Pr(a) - Pr(e)) / (1 - Pr(e))$	(7)
Kesinlik (Precision):	$TP / (TP + FP)$	(8)
F-Ölçütü (F-Measure):	$(2 * Precision * Recall) / (Precision + Recall)$	(9)
MCC:	$\frac{TP * TN - FP * FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}}$	(10)

3.4 Denetimli Öğrenme Algoritmaları

Bu çalışmada farklı türden denetimli ML algoritmaları kullanılmıştır. Denetimli ML algoritmalarında, etiketli eğitim veri seti her şeyden önce temel algoritmayı uygulamak için kullanılır. Bu nitelikli model daha sonra ilgili kategorilere ayırmak için etiketlenmemiş bir test araştırma veri setine yüklenir [50]. Hastalık tespiti için önerilen bu denetimli ML modellerine hızlı bir genel bakış, aşağıda verilmiştir.

Naive Bayes (NB): Bayes teoremine dayanan ve denetimli öğrenme algoritmalarından biri olan Naive Bayes, sınıflandırma problemlerinde kullanılmaktadır. Özellikler birbirinden bağımsız olarak varsayılmaktadır. Bu teknik, olasılık teorisini kullanarak bir grup özellik sunarak tahminleri veya sınıflandırmaların test edilmesine izin verir. Böylelikle her durumun olasılığı hesaplanarak en yüksek olana göre sınıflandırma yapılmaktadır. Naive Bayes, veri hazırlama süreci içerisinde hatalı veya eksik yapılan işlemlerde, yani dengelessiz veri kümelerinde de çalışabilmektedir. [51]

Karar Ağaçları (Decision Tree): Hem regresyon problemleri için hem de sınıflandırma problemleri için kullanılan karar ağaçları, denetimli ML tekniklerinden biridir. Büyük miktarlardaki kayıtları, küçük gruplara bölerek kullanan bir yapıdır. En tepeden en aşağı inen bir strateji uygulamaları ile ağaç yapısına benzemektedir. Görselleştirilmiş olmaları anlamayı ve yorumlamayı kolaylaştırmaktadır. Yapısı itibari ile çok çıktılı problemlerde de kullanılabilir.

Bir karar ağacında sınıflandırma aşamasının ilk noktası kök düğümünün belirlenmesidir. Evet veya hayır koşullarına göre sınıflandırılmaktadır. Kökün oluşturduğu düğümlerin her biri gözlem sonucunda gerçekleşmektedir. Düğüm sayısı arttıkça modelin karmaşıklığı da artmaktadır. En sonda elde edilen kısım yani terim olarak adlandırılan yapraklar sonucun karşımıza çıkma ve üzerinden yorumlama yapabilmeyi sağlayan bölümdür [52].

K-En Yakın Komşu Algoritması (KNN) Regresyon ve sınıflandırma problemlerinde kullanılan ve bunu yaparken uzaklık ölçütlerini hesaplayan K-NN algoritması denetimli ML tekniklerinden biridir. Amaç, veri noktaları gruplandırılmış olan veri tabanlarında yeni nokta ile hangi gruba gireceğini tahmin etmektir. K, bilinmeyen noktanın en yakın komşularının miktarını belirlemektedir. Sonuçları tahmin etmek için algoritmanın k miktarı seçilmektedir. Yeni gelen verinin k sayısına göre, mesafe ölçümü yapılır ve en fazla olan sınıfa dahil etmektedir. Eğer k verisi farklı sınıflara sahipse, algoritma bilinmeyen verinin sınıfının çoğunluk sınıfı ile aynı olduğunu tahmin eder [53].

Rastgele Orman Algoritması (Random Forest): Adından da anlaşılacağı üzere bir orman oluşturur. Bu orman için aslında birden fazla karar ağacı söylemek mümkündür. En doğru ve kararlı olan tahmin elde edilebilmesi için ağaçlar birleştirilmektedir. Eksik kayıtlar içeren bir veri setinde işlem yaparken doğruluğunu korumaktadır. Bu özelliği sayesinde bilgi keşfi sürecindeki veri hazırlama aşamasının süresinden tasarruf etmektedir [54].

Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine): Daha az hesaplama gücü ile pek çok kullanım alanı olan bu yöntemin amacı, gelecekte yeni veri noktasını kolayca doğru kategoriye koyabilmek için n-boyutlu uzayı sınıflara ayırabilen en iyi çizgi veya karar sınırını oluşturmaktır. Bu en iyi karar sınırına hiperdüzlem denilmektedir. SVM algoritması, iki grup arasında bir çizgi oluşturmaktadır. Oluşturulan çizginin bir tarafında sınıfı temsil eden veri noktaları bulunmaktadır. Diğer tarafında ise farklı sınıfa yerleştirilecek veri noktaları bulunmaktadır. Bu durum, sonsuz sayıda satır olması anlamına gelmektedir [55].

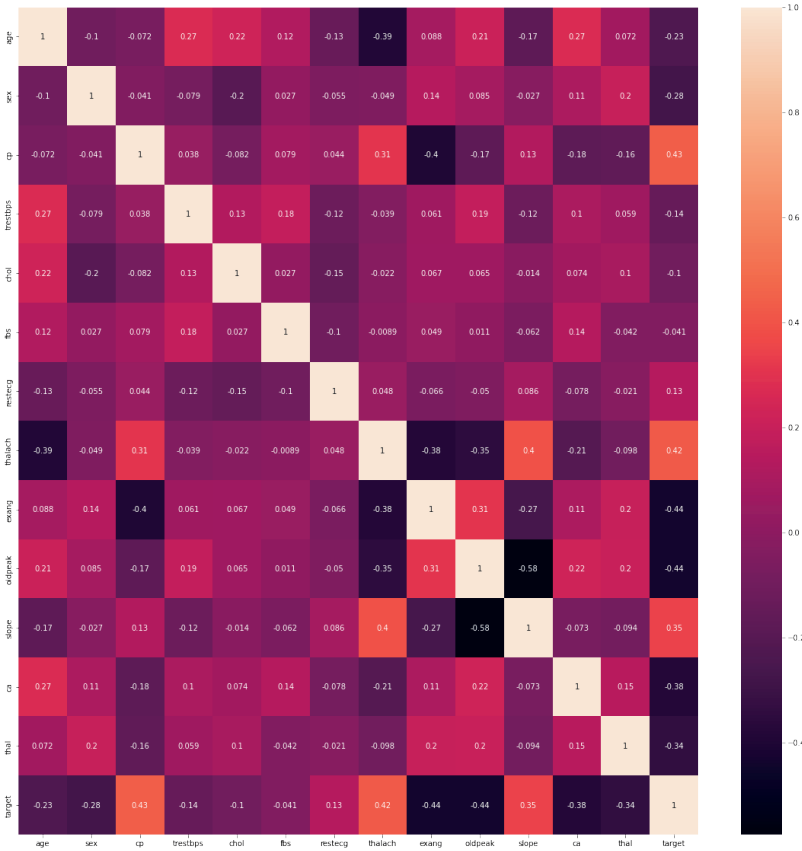
Lojistik Regresyon (Logistic Regression): Bağımlı değişkenin (hedef) bağımsız değişkenler ile olan ilişkisini anlamlandırmaya yarayan bir analiz yöntemidir. Sınıflama ve atama işlemleri ile en uygun gruba atılması söz konusudur. Algoritmanın kullanılabilmesi için bağımlı değişken yani hedef sonlu veya kategorik durumda olmalıdır. Bu modeller, ilişkileri anlamakta ve sonuçları tahmin etmekte yardımcı olduğu gibi karar verme sürecinde de yardımcı olmaktadır [56].

Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP): Üç veya daha fazla katman türünden oluşan, bir sinir ağı tabanlı sınıflandırma algoritmasıdır. Giriş katmanı, çıkış katmanı ve giriş ve çıkış katmanları arasında bir veya daha fazla gizli kat-

mandan oluşmaktadır. Her katman, tüm katmanları birbirine bağlayan bir dizi ‘nöron’ içermektedir. MLP, eğitim verilerinin geri yayma öğrenme yöntemlerini kullanarak eğitim verilerinden öğrenme ve genelleme yapma kapasitesinden kaynaklanan, çok değişkenli, doğrusal olmayan bir hesaplayıcıdır [57].

AdaBoost (ABM): AdaBoost, güçlü bir öğrenici oluşturmak için birçok zayıf öğreniciyi bir araya getiren ve tahminçileri topluca eğiten bir topluluk öğrenme yöntemidir. Veri setlerini ve etiketlerini inceledikten sonra karar ağaçlarını oluşturur. Karar ağaçları oluşturulurken veri seti belirsizlik indeksine göre bölünmektedir [58].

Gradient Boosting Classifier (GBC): Regresyon ve sınıflandırma problemleri için kullanılan topluluk ML algoritmasıdır. Gradyan Boosting amacı, gradyanı ters yönde ilerleterek kayıp fonksiyonu en aza indirmektir. Kayıp fonksiyon, bir modelin belirli bir parametre kümesi için tahminde bulunmada “ne kadar iyi” olduğunu söyleyen bir ölçüdür. Kullanılacak kayıp fonksiyonu problemin türüne bağlı olarak değişmektedir [59].



Şekil – 1: Veri kümesinin tüm özellikleri arasındaki korelasyonları gösteren ısı haritası.

Şekil – 1, özellikler arasındaki bağıntılı değerleri ve bağıntıları temsil eden bir ısı haritasıdır. Tüm renkli hücreler, iki özellik arasındaki bir korelasyonu temsil eder ve bunların hücrenin rengiyle ilişkili değerleri, korelasyonun gücünü belirtir; burada bir korelasyon değerinin sıfırdan küçük olması negatif korelasyonu gösterir ve sıfır değeri korelasyon olmadığını gösterir.

Özelliklerin önemi ve görselleştirilmesi, makine öğrenimi alanında önemli ve yaygın olarak kullanılan bir analiz yöntemidir. Özellik sıralaması veya risk analizinin basitliği ve yorumlanabilirliği nedeniyle özellikle biyotıp ve sosyal bilimler gibi alanlarda uygulanmaktadır [60]. Özellik önemi ve sıralaması, her özelliğin katsayı değerine göre bulunur [45, 46]. Denetlenen algoritmaların çoğu özellik önemi veya katsayı puanı sağlasa da, MLP ve KNN herhangi bir özellik önemi veya katsayı puanı üretmez [54, 55]. Bu iki sınıflandırıcının dışında, özellik önemi veya katsayı puanları belirlenir ve ilgili bölümlerde gösterilir.

Bölüm – 4 Sonuç ve Tartışma

Bu veri seti için, veri setinin özelliklerini daha iyi anlamak için keşifsel veri analizleri (EDA) yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları aşağıda açıklanmaktadır.

Tablo 2: Farklı Sınıflandırma Algoritmalarının Sonuçları

Sınıflandırma Algoritması	Duyarlılık	Özgüllük	Doğruluk	Kappa	MCC
LR	0.919	0.851	88.293	0.766	0.769
DT	1.0	1.0	100	1	1
MLPClassifier	0.986	0.968	98.055	0.954	0.954
KNN	1.0	1.0	100	1	1
RF	1.0	1.0	100	1	1
NB	0.926	0.866	89.756	0.794	0.795
SVM	0.930	0.834	88.780	0.771	0.772
GradientBoosting Classifier	0.943	0.899	92.195	0.846	0.844
AdaBoost	0.951	0.952	95.122	0.903	0.902

Tablo 3: Kesinlik, F-Ölçütü, ROC ve PRC Sonuçları

Sınıflandırma Algoritması	Kesinlik	F-Ölçütü	AUROC	AUPRC
LR	0.850	0.883	0.885	0.819
DT	1.0	1.0	1.0	1.0
MLPClassifier	0.971	0.978	0.976	0.964
KNN	1.0	1.0	1.0	1.0
RF	1.0	1.0	1.0	1.0
NB	0.885	0.905	0.896	0.859
SVM	0.877	0.903	0.882	0.855
GradientBoosting Classifier	0.909	0.926	0.921	0.887
AdaBoost	0.950	0.951	0.952	0.928

Uygulanan veri setine göre 50-60 yaş arası hastaların etkilenen grup olduğu görülmektedir. Bu nedenle yaşın kalp hastalığı için önemli bir faktör olduğunu ve hastalık olasılığının yaşla birlikte arttığını göstermektedir.

4.2. Makine Öğrenimi Analiz Sonuçları

Bu çalışma için bir kalp hastalığı veri seti işlendi, aykırı değerler tespit edildi ve kaldırıldı. LR, DT, MLP, KNN, RF, NB, SVM, GBC ve ABM dahil olmak üzere bir dizi farklı sınıflandırma algoritması uygulandı. Tüm bu sınıflandırma algoritmaları, veri seti üzerinde 10 kat çapraz doğrulama yöntemleri ile kullanılmıştır. Kalp hastalığı oluşumunu tahmin etmek için en iyi performans gösteren algoritmayı belirlemek için farklı çapraz doğrulama performans parametreleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 2, kullanılan sınıflandırma algoritmalarının performans sonuç parametrelerini, yani duyarlılık, özgüllük ve doğruluğu göstermektedir. Bunların tümü, KNN, RF ve DT parametrelerinin maksimum doğruluk, hassasiyet ve özgüllük sağladığı, ardından sırasıyla ABM, GBC, NB, SVM ve LR daha iyi performans gösteren MLP ile en iyi sonuçları vermiştir.

Ayrıca Tablo 2, farklı sınıflandırma algoritmalarının kappa istatistiklerini ve MCC değerlerini göstermektedir. Tabloda sunulan sonuçlara göre MLP, sırasıyla ABM, GBC, NB, SVM ve LR'den çok daha iyi bir performans sergilemektedir. KNN, RF ve DT en iyi performans gösterenlerdir ve en yüksek değeri gösterirler.

Tablo 3'e göre sırasıyla ABM, GBC, NB, SVM ve LR, MLP'den daha zayıf bir performans verirken, kesinlik ve f-ölçüleri dikkate alınır. Aynı zamanda KNN, RF ve DT %100 gibi çok yüksek performans göstermektedir.

Ayrıca Tablo 3 uygulanan tüm sınıflandırma algoritmaları için ROC ve PRC altındaki alan değerini göstermektedir. ROC altındaki alan, gerçek pozitif oranın ve yanlış pozitif oranın ortak bir alanını temsil ederken, PRC altındaki alan, kesinlik ve duyarlılığın ortak bir alanını temsil eder. ABM, GBC, NB, LR ve SVM daha yakın sonuç gösterse de MLP onlardan daha yüksek performans göstermiştir. Diğer yandan, KNN, RF ve DT en iyi sonuçları vermiştir.

Özet olarak, bir kalp hastalığı veri seti toplanmıştır, ön işleme tabi tutulmuştur. Ardından dokuz adet makine öğrenimi algoritması (MLP, KNN, RF, DT, LR, NB, SVM, GBC ve ABM) uygulanmış ve sonuçları doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kappa istatistikleri, kesinlik, F-Ölçütü ve MCC'ye göre değerlendirilmiştir. KNN, DT ve RF'nin %100 doğrulukla en iyi performansı gösterdiği, bunların kalp hastalığını tahmin etmede en etkili olduğunu gösteren, uygulanan tüm algoritmaların iyi performans gösterdiğini bulunmuştur. Herhangi bir özellik önem puanı veya katsayı değeri üretmeyen KNN algoritması dışında uygulanan tüm algoritmaların özellik önemi ve katsayı değerleri

tahmin edilmiştir. Özellik önem puanının sonuçları, bu özelliklerin özellik önem puanına göre sıralanmış ve Tablo 4'te gösterilmiştir. Bu analizler, kalp hastalığı oluşumunu tahmin etmeye çalışan sağlık çalışanları için potansiyel fayda gösterecek, kalp hastalığının saptanması için oldukça tatmin edilebilir özellikler tanımlayacaktır.

Tablo 4 - Uygulanan farklı algoritmaların öznelik önemi ve katsayı puanları.

Öznelik Adı	LR	DT	RF	NB	MLP	SVM	GBC	ABM
age (yaş)	0.0150	0.0712	0.0908	0.0037	0.0008	-0.0020	0.0357	0.21
sex (cinsiyet)	-1.5646	0.0346	0.0331	0.0185	0.	0.0390	0.0280	0.03
Cp	0.8272	0.2903	0.1517	0.0231	-0.0031	0.0712	0.3526	0.02
trestbps	-0.0155	0.0608	0.0759	0.0046	-0.0016	0.0098	0.0342	0.11
chol	-0.0045	0.1082	0.0725	-0.0037	0.0054	0.0117	0.0662	0.18
Fbs	-0.1337	0.0084	0.0107	0.0046	0.	0.	0.	0.01
restecg	0.6548	0.0193	0.0205	-0.0009	-0.0047	0.0117	0.0023	0.01
thalach	0.0287	0.0664	0.1187	0.0204	-0.0132	0.0312	0.0237	0.11
exang	-0.7453	0.0232	0.0590	0.0667	0.	0.0166	0.0019	0.01
oldpeak	-0.5543	0.0922	0.1212	0.05	-0.0008	0.0312	0.0939	0.11
slope	0.6321	0.0436	0.0505	0.0019	0.	0.0059	0.0430	0.04
ca	-0.7054	0.1093	0.1117	0.0324	-0.0008	0.0673	0.1993	0.11
thal	-0.7466	0.0725	0.0838	0.0231	-0.0016	0.0380	0.1194	0.05

Bununla birlikte, gelecekte, bu metodolojinin sınırlarını daha iyi anlamayı ve ek verilerin analizinin, makine öğrenimi yaklaşımlarını kullanarak kalp hastalığı ve ilgili durumların son derece doğru tahminlerini mümkün kılacaktır.

Kalp hastalığı yaşamı tehdit eder ve bu da kalp krizi gibi potansiyel olarak ölümcül komplikasyonlara yol açar. Doğru hastalık tahmin oranı potansiyeli nedeniyle, veri madenciliği ve makine öğrenimi tekniklerinin önemi, oluşumunu tahmin etmek için kullanılabilir. Burada, kalp hastalığı tahminine yönelik makine öğrenimi yaklaşımlarının faydasını test etmek için bir kalp hastalığı veri kümesi kullanılmış ve üç sınıflandırma algoritması olan KNN, RF ve DT'nin %100 doğrulukla son derece iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca MLP ve KNN dışında uygulanan tüm algoritmalar için her bir özellik için özellik önem puanları tahmin edilmiştir. Bu özellikler, özellik önem puanına göre sıralanmıştır. Çalışma, iyi kabul gören ve uygula-

ması kolay bir dizi algoritma arasından en iyi makine öğrenimi tekniklerini bulmayı amaçlamış ve en azından bunların veri kümesi için iyi performansı gösterdiği bulunmuştur. Bu, makine öğrenimi yaklaşımlarını kullanmanın erken bir aşamasıdır ve hastalığın önlenmesinde mükemmel bir yardımcı olabileceğini düşündürmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Heart Disease Overview, Mayo Clinic, 2023, <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/heart-disease/symptoms-causes/syc-20353118> [Retrieved: 30 May 2023].
- [2] Cardiovascular Diseases, WHO, 2023, https://www.who.int/health-topics/cardiovascular-diseases#tab=tab_1 [Retrieved: 30 May 2023].
- [3] Chang, V., Bhavani, V. R., Xu, A. Q., & Hossain, M. A. (2022). An artificial intelligence model for heart disease detection using machine learning algorithms. *Healthcare Analytics*, 2, 100016.
- [4] Ahsan, M. M., & Siddique, Z. (2022). Machine learning-based heart disease diagnosis: A systematic literature review. *Artificial Intelligence in Medicine*, 102289.
- [5] Alanazi, A. (2022). Using machine learning for healthcare challenges and opportunities. *Informatics in Medicine Unlocked*, 100924.
- [6] Yahaya, L., Oye, N. D., & Garba, E. J. (2020). A comprehensive review on heart disease prediction using data mining and machine learning techniques. *American Journal of Artificial Intelligence*, 4(1), 20-29.
- [7] Diwakar, M., Tripathi, A., Joshi, K., Memoria, M., & Singh, P. (2021). Latest trends on heart disease prediction using machine learning and image fusion. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3213-3218.
- [8] Cai, J., Luo, J., Wang, S., & Yang, S. (2018). Feature selection in machine learning: A new perspective. *Neurocomputing*, 300, 70-79.
- [9] Canlas, R. D. (2009). Data mining in healthcare: Current applications and issues. School of Information Systems & Management, Carnegie Mellon University, Australia.
- [10] Helma, C., Gottmann, E., & Kramer, S. (2000). Knowledge discovery and data mining in toxicology. *Statistical methods in medical research*, 9(4), 329-358.
- [11] Lee, I. N., Liao, S. C., & Embrechts, M. (2000). Data mining techniques applied to medical information. *Medical informatics and the Internet in medicine*, 25(2), 81-102.
- [12] Parthiban, L., & Subramanian, R. (2008). Intelligent heart disease prediction system using CANFIS and genetic algorithm. *International Journal of Biological, Biomedical and Medical Sciences*, 3(3).
- [13] Austin, P. C., Tu, J. V., Ho, J. E., Levy, D., & Lee, D. S. (2013). Using methods from the data-mining and machine-learning literature for disease classification and prediction: a case study examining classification of heart failure subtypes. *Journal of clinical epidemiology*, 66(4), 398-407.
- [14] Ozcan, M., & Peker, S. (2023). A classification and regression tree algorithm for heart disease modeling and prediction. *Healthcare Analytics*, 3, 100130.

- [15] Ali, M. M., Paul, B. K., Ahmed, K., Bui, F. M., Quinn, J. M., & Moni, M. A. (2021). Heart disease prediction using supervised machine learning algorithms: Performance analysis and comparison. *Computers in Biology and Medicine*, 136, 104672.
- [16] Li, J. P., Haq, A. U., Din, S. U., Khan, J., Khan, A., & Saboor, A. (2020). Heart disease identification method using machine learning classification in e-healthcare. *IEEE Access*, 8, 107562-107582.
- [17] Rani, P., Kumar, R., Ahmed, N. M. S., & Jain, A. (2021). A decision support system for heart disease prediction based upon machine learning. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 7(3), 263-275.
- [18] Pathan, M. S., Nag, A., Pathan, M. M., & Dev, S. (2022). Analyzing the impact of feature selection on the accuracy of heart disease prediction. *Healthcare Analytics*, 2, 100060.
- [19] Ripan, R. C., Sarker, I. H., Hossain, S. M. M., Anwar, M. M., Nowrozy, R., Hoque, M. M., & Furhad, M. H. (2021). A data-driven heart disease prediction model through K-means clustering-based anomaly detection. *SN Computer Science*, 2, 1-12.
- [20] Yilmaz, R., & Yağın, F. H. (2022). Early detection of coronary heart disease based on machine learning methods. *Medical Records*, 4(1), 1-6.
- [21] Doppala, B. P., Bhattacharyya, D., Janarthanan, M., & Baik, N. (2022). A reliable machine intelligence model for accurate identification of cardiovascular diseases using ensemble techniques. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022.
- [22] Tiwari, A., Chugh, A., & Sharma, A. (2022). Ensemble framework for cardiovascular disease prediction. *Computers in Biology and Medicine*, 146, 105624.
- [23] Mienye, I. D., Sun, Y., & Wang, Z. (2020). An improved ensemble learning approach for the prediction of heart disease risk. *Informatics in Medicine Unlocked*, 20, 100402.
- [24] Javeed, A., Zhou, S., Yongjian, L., Qasim, I., Noor, A., & Nour, R. (2019). An intelligent learning system based on random search algorithm and optimized random forest model for improved heart disease detection. *IEEE access*, 7, 180235-180243.
- [25] Pan, C., Poddar, A., Mukherjee, R., & Ray, A.K. (2022). Impact of categorical and numerical features in ensemble machine learning frameworks for heart disease prediction. *Biomedical Signal Processing and Control*, 76, 103666.
- [26] Sheeba, P.T., Roy, D., & Syed, M.H. (2022). A metaheuristic-enabled training system for ensemble classification technique for heart disease prediction. *Advances in Engineering Software*, 174, 103297.
- [27] Kumar, A.S., & Rekha, R. (2023). An improved hawks optimizer based learning algorithms for cardiovascular disease prediction. *Biomedical Signal Processing and Control*, 81, 104442.
- [28] Dehkordi, S.K., & Sajedi, H. (2019). Prediction of disease based on prescription

- using data mining methods. *Health and Technology*, 9, 37-44.
- [29] Terrada, O., Hamida, S., Cherradi, B., Raihani, A., & Bouattane, O. (2020). Supervised machine learning based medical diagnosis support system for prediction of patients with heart disease. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5(5), 269-277.
- [30] Tama, B.A., Im, S., & Lee, S. (2020). Improving an intelligent detection system for coronary heart disease using a two-tier classifier ensemble. *BioMed Research International*, 2020.
- [31] Hasan, N., & Bao, Y. (2021). Comparing different feature selection algorithms for cardiovascular disease prediction. *Health and Technology*, 11, 49-62.
- [32] Reddy, K.V.V., Elamvazuthi, I., Aziz, A.A., Paramasivam, S., Chua, H.N., & Prananand, S. (2021). Heart disease risk prediction using machine learning classifiers with attribute evaluators. *Applied Sciences*, 11(18), 8352.
- [33] Ayon, S.I., Islam, M.M., & Hossain, M.R. (2022). Coronary artery heart disease prediction: a comparative study of computational intelligence techniques. *IETE Journal of Research*, 68(4), 2488-2507.
- [34] Doppala, B.P., Bhattacharyya, D., Chakkravarthy, M., & Kim, T.H. (2021). A hybrid machine learning approach to identify coronary diseases using feature selection mechanism on heart disease dataset. *Distributed and Parallel Databases*, 1-20.
- [35] Akella, A., & Akella, S. (2021). Machine learning algorithms for predicting coronary artery disease: efforts toward an open source solution. *Future science OA*, 7(6), FSO698.
- [36] Nadeem, M. W., Goh, H. G., Khan, M. A., Hussain, M., Mushtaq, M. F., & Ponnu-samy, V. A. (2021). Fusion-based machine learning architecture for heart disease prediction. *Computers, Materials & Continua*, vol. 67, no.2, pp. 2481-2496, 2021.
- [37] Katarya, R., & Meena, S. K. (2021). Machine learning techniques for heart disease prediction: a comparative study and analysis. *Health and Technology*, 11(1), 87-97.
- [38] Asadi, S., Roshan, S., & Kattan, M. W. (2021). Random forest swarm optimization-based for heart diseases diagnosis. *Journal of Biomedical Informatics*, 115, 103690.
- [39] Valarmathi, R., & Sheela, T. (2021). Heart disease prediction using hyper parameter optimization (HPO) tuning. *Biomedical Signal Processing and Control*, 70, 103033.
- [40] Dissanayake, K., & Md Johar, M.G. (2021). Comparative Study on Heart Disease Prediction Using Feature Selection Techniques on Classification Algorithms. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2021.
- [41] <https://www.kaggle.com/johnsmith88/heart-disease-dataset> [Retrieved: 30 May 2023].

- [42] Rahman, M. R., Islam, T., Zaman, T., Shahjaman, M., Karim, M.R., Huq, F., ... & Moni, M.A. (2020). Identification of molecular signatures and pathways to identify novel therapeutic targets in Alzheimer's disease: Insights from a systems biomedicine perspective. *Genomics*, 112(2), 1290-1299.
- [43] Boukerche, A., Zheng, L., & Alfandi, O. (2020). Outlier detection: Methods, models, and classification. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 53(3), 1-37.
- [44] Wan, X., Wang, W., Liu, J., & Tong, T. (2014). Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range. *BMC medical research methodology*, 14, 1-13.
- [45] Le, H. M., Tran, T. D., & Van Tran, L. A. N. G. (2018). Automatic heart disease prediction using feature selection and data mining technique. *Journal of Computer Science and Cybernetics*, 34(1), 33-48.
- [46] Cabezas, L. M., Izbicki, R., & Stern, R. B. (2023). Hierarchical clustering: visualization, feature importance and model selection. *Applied Soft Computing*, 110303.
- [47] Chitra, R., & Seenivasagam, V. (2013). Heart disease prediction system using supervised learning classifier. *Bonfring International Journal of Software Engineering and Soft Computing*, 3(1), 01-07.
- [48] Asaduzzaman, S., Ahmed, M. R., Rehana, H., Chakraborty, S., Islam, M. S., & Bhuiyan, T. (2021). Machine learning to reveal an astute risk predictive framework for Gynecologic Cancer and its impact on women psychology: Bangladeshi perspective. *BMC bioinformatics*, 22(1), 213.
- [49] Akter, T., Satu, M. S., Khan, M. I., Ali, M. H., Uddin, S., Lio, P., ... & Moni, M. A. (2019). Machine learning-based models for early stage detection of autism spectrum disorders. *IEEE Access*, 7, 166509-166527.
- [50] Uddin, S., Khan, A., Hossain, M. E., & Moni, M. A. (2019). Comparing different supervised machine learning algorithms for disease prediction. *BMC medical informatics and decision making*, 19(1), 1-16.
- [51] Fatima, M., & Pasha, M. (2017). Survey of machine learning algorithms for disease diagnostic. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 9(01), 1.
- [52] Fan, Q., Wang, Z., Li, D., Gao, D., & Zha, H. (2017). Entropy-based fuzzy support vector machine for imbalanced datasets. *Knowledge-Based Systems*, 115, 87-99.
- [53] Dasarathy, B.V. (1991). Nearest neighbor (NN) norms: NN pattern classification techniques. *IEEE Computer Society Tutorial*.
- [54] Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32.
- [55] Pisner, D. A., & Schnyer, D. M. (2020). Support vector machine. In *Machine learning* (pp. 101-121). Academic Press.
- [56] Cessie, S. L., & Houwelingen, J. V. (1992). Ridge estimators in logistic regression. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 41(1), 191-201.
- [57] Chatterjee, A., Saha, J., & Mukherjee, J. (2022). Clustering with multi-layered perceptron. *Pattern Recognition Letters*, 155, 92-99.

- [58] Li, K., Zhou, G., Zhai, J., Li, F., & Shao, M. (2019). Improved PSO_AdaBoost ensemble algorithm for imbalanced data. *Sensors*, 19(6), 1476.
- [59] Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 1189-1232.
- [60] Lane, M., Maiocco, A., Bhatia, S. K., & Climer, S. (2020). Eyeing the patterns: Data visualization using doubly-seriated color heatmaps. *In Advances in Computers* (Vol. 119, pp. 121-156). Elsevier.

Bölüm 5

MADENCİLİKTE BİYOTEKNOLOJİ UYGULAMALARI

Zehra ÇETİNKAYA¹

Oktay BAYAT²

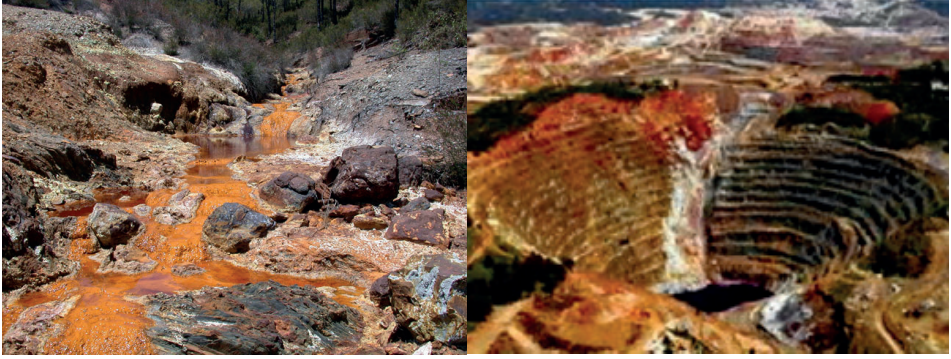
1 Öğr. Gör. Dr. Zehra Çetinkaya, Çukurova Üniversitesi,
Merkezi Araştırma Laboratuvarı, ORCID ID: 0000-0002-0553-0102
2 Prof. Dr. Oktay Bayat, Çukurova Üniversitesi,
Maden Mühendisliği Bölümü, ORCID ID: 0000-0003-2330-3074



1. GİRİŞ

Günümüzden 3,8 milyar yıl önce mikroorganizmaların yeryüzünde yaşamaya başlamış olduğu bilinmektedir. Bu ilk canlı organizmalar; oksijensiz, hidrojen, amonyak, karbondioksit ve metan içerikli indirgeyici bir atmosferik ortamda ortaya çıkmıştır. Mikrobiyal organizmalar o zamanlarda metabolizmaları için oksijen yerine hayatta kalabilmek için hidrojen veya metan gibi mevcut kaynakları kullanmışlardır. Bu mikroorganizmalar, anaerobik metabolizmalardır. Bunların metabolizması, aerobik ve oksijenli metabolizmalara kıyasla 30-50 kat daha az etkindir. Mikroorganizmaların inanılmaz bir adaptasyon kabiliyetine sahip olduğu kanıtlanmıştır. Bu, onların dünya üzerindeki ekvator bölgelerindeki sıcak iklimlerden, kutuplardaki dondurucu soğuk iklimlere kadar varoluşlarını sağlamıştır. Ortam şartlarına göre en iyi uyum sağlama özelliklerine göre sınıflandırıldığında; ekstremofilik sınıfı altında acidophiles, metanojenler ve termofiliği içermektedir. Bazıları ise psikrofilik koşullarda çok kolay adapte olabilirler. Mikroorganizmaların; su arıtma ve ayrıca petrol felaketleri sonucu kirlenen alanları temizleme çalışmalarında da kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca günümüzde mikroorganizmaların mineral çözme yeteneklerinden de yararlanılmaktadır (Gahan ve ark. 2012)

Biyomadencilik terimi; maden artıklarından ve/veya düşük metal içerikli cevherlerden metal kazanımı (ekstrakte) olarak tanımlanmaktadır. İlk ticari uygulama, 1960'larda bakır ve uranyum kazanımında olmuştur. 1980'lerin ortalarında ise özellikle altın cevherinin ön zenginleştirilmesinde kullanılmıştır. Günümüzde ise düşük ilk yatırım ve işletme maliyetinden dolayı biyomadencilik faaliyeti; Şili, Endonezya, Meksika, Peru ve Zambiya gibi ülkelerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. 1960'larda ilk defa biyomadencilik modern uygulaması yığın içinden bakır kazanımı için Kennecott Bingham Canyon madeninde, Utah, ABD'de başlamıştır. 1980-1998 yılları arasında ise biyomadencilik yöntemleriyle bakır kazanımı %10'dan %25'e çıkmıştır. 1992'de ise dünyadaki en iyi madencilik firmalarından Rio Tinto (İngiltere) şirketinin etkisi ile biyomadencilik çok popüler bir uygulama haline gelmiştir (Şekil 1). Kalkosin'den (Cu_2S) bakır, Pentlandit'den ($(FeNi)_9S_8$) nikel, Sfaletrit'den (ZnS) çinko, Galen'den (PbS) kurşun ve Arsenopirit ($FeAsS$) gibi altın içeren cevherlerden altın kazanılması gibi birçok metal, biyomadencilikte kullanılan mikroorganizmalar ile kazanılabilmektedir (Gahan ve ark. 2012).



Şekil 1. Asidik Maden Suları ve Maden Açık Ocak İşletmesi, RioTinto, İspanya (Gahan ve ark. 2012)

2. BAKTERİLERİN ÇÖZME MEKANİZMALARI

Biyoliç, cevher veya metal konsantrelerinden metalik bileşiklerin, mikroorganizmaların katalizör etkisi ile 5-90 °C sıcaklık aralığında ve normal basınç altında çözüldürüldüğü bir işlemi ifade etmektedir. Bu işlem, asidofilik bakterilerin demir ve kükürdü kullanarak farklı doğal ortamlarda gelişmeleri için önemli bir enerji kaynağı sağlaması ile gerçekleşmektedir (Sever ve Bayat, 2008).

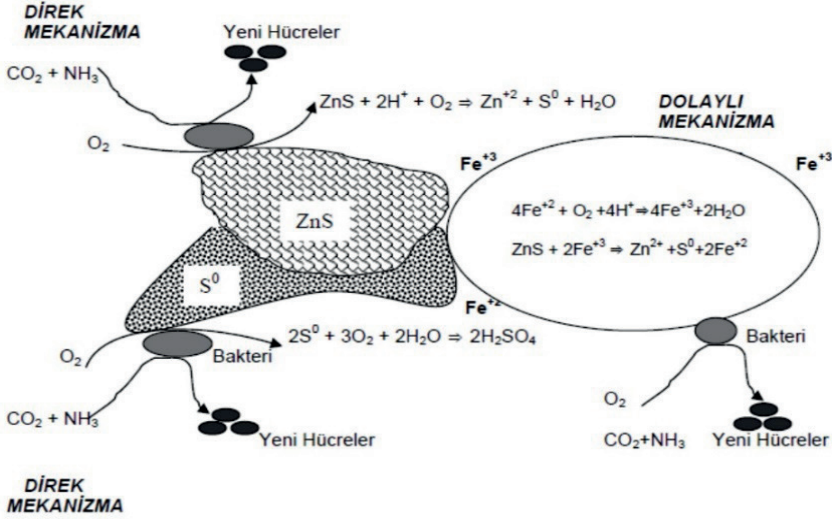
3. BİYOMADENCİLİK MEKANİZMALARI

Biyomadencilik işleminde kullanılan mikroorganizmalar, mineralleri kendi elementlerine parçalayarak enerji kazanır. Mineral çözünme reaksiyonu tüm metal sülfürler için aynı değildir (Siddiqui ve ark. 2009). Doğrudan (Direkt) ve Dolaylı (endirekt) mekanizmalar olarak 2'ye ayrılır (Şekil 2) (Sand ve ark. 1999).

Doğrudan (direkt) Mekanizma: Biyoliç işleminin doğrudan mekanizmasında, bakteriler mineral yüzeyine yapışarak minerali doğrudan oksitleyerek çözüne hale getirirler. Ara bir işlem olmadan gerçekleşen bu yöntem, hiçbir ara işlem olmadan minerali doğrudan oksitlemektedir (URL-1).

Dolaylı (endirekt) Mekanizma: Endirekt biyoliçte, bakteriler yerine bu bakterilerin ürettiği kimyasallar aracılığıyla mineral oksidasyonu gerçekleştirilir (URL-1). Pirit (FeS_2) ve molibdenit (MoS_2) gibi asitte çözünmeyen metallerin oksidasyonu tiyosülfat mekanizması ile sfelirit (ZnS), kalkopirit ($CuFeS_2$) ve galen (PbS) gibi asitte çözülebilen metal sülfürlerinin oksidasyonunu ise polisülfid mekanizması ile açıklanmaktadır. Tiyosülfat mekanizmasında asitte çözünmeyen metal sülfürlerin çözünmesi ferrik demir (Fe^{+3}) tarafından gerçekleştirilir (Siddiqui ve ark. 2009). Polisülfid mekanizmasında ise asitte çözünen metal sülfürlerin çözünmesi ferrik demir (Fe^{+3}) ve protonlar (H^+) tarafından gerçekleştirilir. Elementel sülfür başlıca ara üründür ve göreceli olarak kararlı olmasına rağmen sülfür oksitleyici bakteriler tarafından sülfata oksitlenebilir. Bu durum, neden *A. thiooxidans* veya *A. caldus* gibi sülfür oksitleyici bakterilerin bazı metalleri

liç edebilir iken diğerlerini yapamadığını açıklamaktadır. Metal çözünme ve biyomadencilik sırasında üretilen ferrik demir, demir oksitleyici mikroorganizmalar tarafından tekrardan ferrik demire oksitlenmektedir (Siddiqui ve ark. 2009).



Şekil 2. Direkt ve Dolaylı Biyomadencilik Mekanizmaları (Tributsch, 2001).

4. BİYOMADENCİLİK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Biyomadencilik işlemi iki ana üretim yöntemine ayrılabilir. Bunlar;

a) Biyooksidasyon = Değerli (pahalı) metallerin çıkarılması için uygulanan bir yöntemdir

b) Biyoliç = Ana metallerin (ucuz metaller) çıkarılması için uygulanan bir yöntemdir.

4.1. Biyooksidasyon

Biyooksidasyon; refrakter sülfürlü altın cevherlerinin ve konsantrlerinin işlenmesi için endüstriyel olarak kanıtlanmış bir yöntemdir. Bu yöntemde, farklı sıcaklıklarda gelişen asidik ortamlarda farklı bakteri kültürleri kullanılır. Bu bakteriler, cevherdeki demir (II) ve sülfürü oksitleyerek gelişimlerini ve faaliyetlerini sürdürebilmek için gerekli olan enerjiyi elde etmektedir. İlk biyooksidasyon tesisi 1986 yılında GENCOR firması tarafından Fairview madeni, Güney Afrika'da kurulmuştur. GENCOR tarafından geliştirilen BIOX prosesi, 40-45 °C ve çoğunlukla karıştırmalı tank işlemleri ile kullanılmıştır. BacTech teknolojisi ise 45-55 °C orta derece termofilik sıcaklıklarda uygulanmıştır. Biyooksidasyon tesisi olarak birçok tesis kurulmuştur. Bunlardan en önemlilerinden bir tanesi 1994 yılında 1000 ton/gün altın üretimi gerçekleştiren Sansuda, Gana'da kurulan biyooksidasyon tesisidir (Pieter ve ark. 2007).

Altın madenciliği genellikle cevherin siyanür ile çözündürülerek, altının çözeltilmesi ve buradan metal kazanımı şeklinde yapılır. Refrakter olarak bilinen cevherlerde ise altın tanecikleri çözünmeyen sülfürlerle kaplıdır. Biyooksidasyon prosesinde, bakteri kısmen, cevher ve konsantredeki altının mikro partikülleri üzerindeki sülfürleri oksitler. Birinci aşamada; bakteri, sülfür ve metalini (arsenik iyonu varsa) oksitleyerek arsenopirit mineralini (FeAsS) parçalayarak katalize eder, aynı zamanda da H^{+2} ve Fe^{+3} ile dioksijeni indirir. Böylece metallerin çözünmesine imkân sağlar. Bu işlem bakterinin hücre zarında gerçekleşir. Elektronlar hücre zarına geçer ve bakterinin suya oksijen moleküllerinin indirgeyerek enerji üretmesi için gerekli olan biyokimyasal proste kullanılır. İkinci aşamada ise bakteri, Fe^{+2} den Fe^{+3} ye oksitlenir. Daha sonra ise metali daha yüksek bir pozitif oksidasyon aşamasına oksitler. Buradan kazanılan elektronlar, döngüyü devam ettirmek için Fe^{+3} den Fe^{+2} e indirgenir. Bu şekilde altın, çözeltili içinde ana cevherden ayrılmış olur. Bu şekilde siyanür liçi öncesi yapılan Biyooksidasyon ön hazırlama işlemi ile refrakter tipi (siyanür ile zor çözünen) altın cevherlerinden altın kazanım verimi %15-30'dan %85-95'e kadar artmaktadır (Siddiqui ve ark. 2009). Son 20 yılda hızla gelişen teknoloji ile birçok altın biyooksidasyon tesisleri kurulmuştur ve Çizelge 1'de kullanılan prosesler verilmiştir.

Çizelge 1. Refrakter Altın Konsantrelerinin Ön İşlenmesi için Sürekli Karıştırılan Tank Biyooksidasyonu Kullanan Prosesler (Gahan ve ark. 2012).

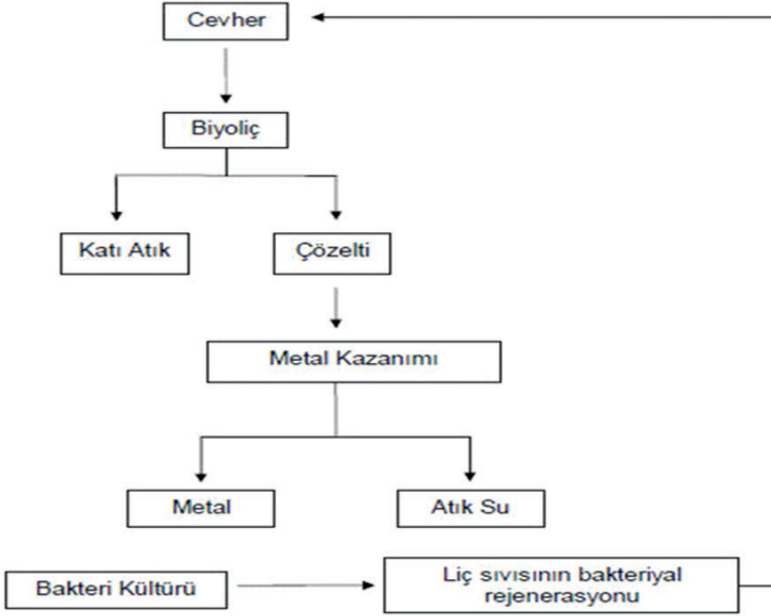
Endüstriyel Tesis ve Konumu/Sahibi	Kapasite (ton-Au)	İşletme Yılları	Proses
Fairview, Barberton, Güney Afrika / African Resources	62	1986-	Gold field's BIOX®
Sao Bento, Brezilya/Anglo Gold Ashanti	150	1991-2008	Gold field's BIOX®.
Harbour Lights, Batı Avustralya	40	1991-1994	Gold field's BIOX®.
Wiluna, Batı Avustralya/Apex Minerals	158	1993-	Gold field's BIOX®
Ashanti, Obuasi, Gana/Anglo Gold Ashanti	960	1994-	Gold field's BIOX®
Youanmi, Batı Avustralya	120	1994-1998	BacTech Bacox
Tamboraque, san Mateo, Peru/Gold Hawk Resources	60	1998-2003	Gold field's BIOX
Beaconsfield, Tasmania, Australia/ Beaconsfield Gold	70	2000-	BacTech Bacox
Laizhou, Shandong Province, Çin/Eldorado Gold	100	2001-	BacTech Bacox
Suzdal, Kazakistan/Centroservice	196	2005-	Gold field's BIOX®
Fosterville, Victoria, Avustralya/North Gate Minerals	211	2005-	Gold field's BIOX®
Bogoso, Gana/Golden Star Resources	750	2006-	BacTech Bacox
Jinfeng, Çin/Eldorado Gold	790	2006-	Gold field's BIOX®
Kokpatas, Özbekistan/Navoi Mining and Metallurgy	1069	2008-	Gold field's BIOX®
Coricancha, Peru	60	1998-2008	Gold field's BIOX®

BacTech (Kanada) madencilik firması tarafından geliştirilen BACOX prosesi ile refrakter altın konsantrelerini zenginleştirmektedir. Proseste; basitçe, reaktör (tank) içerisinde sülfürleri oksitleyen ve doğal olarak oluşan bakteriler kullanılır. Bakterilerin yaşamaları için en uygun değer yaşam ve üreme koşullarının sağlanması çok önemlidir. Bakteriler, 5-6 gün gibi az bir süre içinde sülfürleri oksitleyebilir. Bu süre, ticari biyoliç tesislerinde genel biyooksidasyon süresidir (Rawlings ve ark. 2003)

Günümüzde, en az 3 farklı tesiste BACOX prosesi kullanılmaktadır. Son olarak 2004 yılında BACOX prosesi Tarzan BioGold Co. Firmasının Çin'in Shandong eyaletine bağlı Liazhou'de kurulmuştur (URL-2). Minbac BacTech teknolojisi Avustralya ve Uganda'da Bateman ve Mintek tarafından ortaklaşa geliştirilmiştir. Son zamanlarda BacTech Şirket Papua Yeni Gine'de iki refrakter altın yataklarından altın kazanmak için Haziran 2008 tarihinde bir anlaşma imzalamıştır. BacTech madencilik, Ontario yakınlarındaki Gowganda bulunan Castleda arsenikli maden artıklarından Co, Ni ve Ag metal kazanımı üzerine önemli çalışmalar yapmışlardır (Dresher, 2004).

4.2. Biyoliç

Biyoliç, mikroorganizmaların katalizör etkisiyle cevher veya atık metal konsantrelerinden metalik bileşiklerin çözündürülmesi işlemidir. Bu yöntem genellikle çevre açısından risk taşıdığından endüstriyel uygulama alanında kontrollü bir şekilde kullanılmaktadır. Biyoliç prosesi özellikle düşük kaliteli cevherlerden altın ve bakırın kazanılması, endüstriyel atıklardan metallerin geri kazanılması veya metal üreten ve işleyen endüstrilerde yeniden kullanılabilmesi için ekonomik bir yöntem olarak kullanılabilir (Brandl, 2001). Şekil 3'de bu prosesin şematik bir görünümü verilmektedir.



Şekil 3. Biyoliç Prosesinin Akım Şeması (URL-3).

4.2.1. Biyoliçi Etkileyen Faktörler

Biyoliç prosesi, birçok fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktörün etkisi altındadır. Bu faktörleri tam olarak anlamak, prosesin optimize edilmesi için oldukça önemlidir (Chen ve Lin, 2000). Genel olarak, biyoliç prosesinin etkinliği mikroorganizmaların verimliliği ile liç edilecek malzemenin mineralojik ve kimyasal kompozisyonuna bağlıdır (Bosecker, 2007).

Maksimum metal kazanımı, mikroorganizmanın optimum büyüme şartları ile biyoliç şartlarının uyumlu olduğu zaman gerçekleşir. Biyoliç prosesini etkileyen en önemli faktörler arasında besin maddeleri (nütrientler), oksijen, karbondioksit, pH, sıcaklık, mineral substrat, ağır metaller, yüzey aktif maddeler (sümfaktanlar) ve organik çözücüler yer alır (Rawlings ve Johnson, 2006).

Mezofilik bakteriler, fonksiyonlarını etkin bir şekilde 15-45°C arasındaki sıcaklık aralığında gösterirler. Mezofilik bakteri grubuna örnek olarak demir ve sülfür oksitleyebilen *Acidithiobacillus ferrooxidans* türleri, sülfür oksitleyebilen *Acidithiobacillus thiooxidans* türleri ve demir oksitleyebilen *Leptospirillum ferrooxidans* türleri verilebilir.

Orta derecede termofilik (ısı seven) bakteriler, sülfür ve demir bileşiklerini 40-65°C sıcaklık aralığında oksitleme kabiliyetine sahiptirler. Bu bak-

teri grubu üzerinde mezofilik bakteriler kadar fazla çalışılmamıştır. Biyoliç işlemlerinde *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, *Sulfobacillus acidophilus*, *Acidophilus ferrooxidans* ve *Thiobacillus caldus* gibi kısmen termofilik bakterilerin en yaygın kullanılan türler olduğu belirtilmektedir.

Aşırı termofilik bakteriler, sağlıklı bir şekilde gelişebilmeleri için ortam sıcaklığı 60-95°C arasındadır. Bu grup üzerinde en çok çalışılan ve tamamı Archaea ailesine ait olan aşırı termofilik bakterilere örnek olarak *Sulfolobus acidocaldarius*, *Sulfolobus metallicus* ve *Acidianus brierleyi* gösterebiliriz (URL-6).

4.2.2. Biyomadencilikte kullanılan bakteriler

Biyoliç ortamında sık rastlanılan ve en etkili olan mikroorganizmalar; *Thiobacillus*, *Sulfobacillus*, *Sulfolobus* ve *Leptospirillum* türleridir (Çizelge 2) (David ve ark. 2007).

Çizelge 2. Biyomadencilikte Kullanılan Bakteriler (David ve ark. 2007).

Fe(II) → Fe(III)	S ⁰ → SO ₄
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>
<i>Leptospirillum spp</i>	<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>
<i>Ferroplasma acidarmanus</i>	<i>Acidithiobacillus caldus</i>
<i>Acidimicrobium ferrooxidans</i>	<i>Alicydobacillus tolerans</i>
<i>Ferromicrobium acidophilus</i>	<i>Sulfolobus sp.</i>
<i>Alicydobacillus tolerans</i>	<i>Thermoplasma acidophilum</i>
<i>Sulfolobus metallicus</i>	<i>Picrophilus oshimae</i>
<i>Metallosphaera sp.</i>	<i>Sulfobacillus acidophilus</i>
<i>Acidianus sp.</i>	<i>Metallosphaera sp.</i>
	<i>Acidianus sp.</i>

Acidithiobacillus ferrooxidans; 1951 yılında Temple ve Colmer tarafından izole edilen ilk demir oksitleyici bakteridir. Bu bakteri, metalleri liç etme yeteneğine sahiptir ve asidofilik doğası madencilik endüstrisinde önemli değişikliklere yol açmıştır. *Acidithiobacillus ferrooxidans*, demir ve indirgenmiş sülfür bileşiklerini oksitleyerek çeşitli metalleri liç edebilme yeteneğine sahiptir ve bu nedenle yoğun bir şekilde araştırılmıştır (Tuovinen ve Kelly, 1972). Bakteri, gram negatif ve kemolitotrofik olarak gelişir. Hücreleri çubuk şeklindedir ve 0,5-1 µm çapa ve 1,5-2 µm uzunluğa sahiptir. Enerji kaynağı olarak demir(II) ve indirgenmiş sülfür bileşiklerini (elementel sülfür, tiyosülfat ve tetratiyonat) oksitleyerek kullanır (Kelly ve Harrison, 1989). *Acidithiobacillus ferrooxidans* tek bir kutupsal kamçı ile hareket eder. Bakteri, hücresel karbon kaynağını Calvin Benson dönüşümüyle havadaki karbondioksitten

(CO₂) elde eder (Leduc ve Ferroni, 1994; Hutchins ve ark. 1986). *Acidithiobacillus ferrooxidans*'ın SEM'de büyütülmüş görüntüsü Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu bakteri pH 2,0'de optimum olarak gelişirken, faaliyetlerini pH 1,5 ile 6,0 aralığında sürdürebilir. *Acidithiobacillus ferrooxidans*, 15-37°C arasındaki sıcaklık aralığında gelişen mezofilik bir bakteridir ve en uygun değer olarak yaklaşık 30°C'de gelişir (Silverman ve Lundgren, 1959). Bununla birlikte, optimum sıcaklık türler arasında değişebilir (Ahonen ve Touvien, 1989). *Acidithiobacillus ferrooxidans*, oksijeni kullanan aerobik bir bakteri olup son elektron alıcısı olarak demir(III)'ü kullanabilir. Ancak sınırlı veya oksijensiz koşullarda da yaşayabilir (Pronk ve ark. 1992).

Acidithiobacillus thiooxidans; sadece elementel sülfür gibi sülfür bileşiklerini oksitleyen, gram negatif ve genellikle 1-1,5 µm uzunluğunda kısa çubuk şeklinde olan bir bakteridir. Morfolojik olarak *Acidithiobacillus ferrooxidans*'a benzer, ancak enerji kaynağı olarak demir(II)'yi oksitleyemez (Lizama ve Suzuki, 1988). Bu bakterinin optimum gelişme sıcaklığı 28-30°C aralığındadır ancak 10- 37°C arasındaki sıcaklıklarda da gelişebilir. pH değeri olarak optimum olarak 2,0 ile 3,0 aralığında gelişme gösterir iken fonksiyon faaliyetlerini pH 0,5 ile 5,5 arasında sürdürebilir (Kelly ve Harrison, 1989). *Acidithiobacillus thiooxidans*'ın SEM'de büyütülmüş görüntüsü Şekil 5'te gösterilmiştir *Acidithiobacillus thiooxidans*, biyolojide indirgenmiş sülfür bileşiklerinin sülfürik aside oksidasyonunda ototrofik metabolizma şekliyle önemlidir. Sülfürik asit, sülfürlü minerali çözebilir ve bu şekilde metal çözeltiye geçebilir (Hutchins ve ark. 1986). Sülfür oksidasyonu sülfiti ara ürün olarak oluşturur ve hızlı bir şekilde sülfürik aside oksitlenir (Suzuki ve Takeuchi, 1992)



Şekil 4. *Acidithiobacillus Ferrooxidans* Bakteri Kültürünün Elektron Mikroskopta Büyütülmüş Görünümü (Goldfields, 2008).



Şekil 5. *Acidithiobacillus Thiooxidans* Bakteri Kültürünün Elektron Mikroskopta Büyütülmüş Görünümü (URL-7).

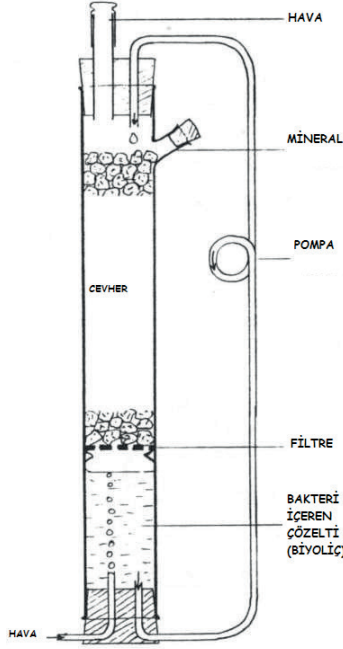
4.2.3. Biyoliç Teknikleri

Endüstriyel uygulamadan önce her tip cevher için en uygun liç koşullarının belirlenmesi gerekmektedir (Bosecker, 1997). Metal kazanımı için en iyi sonucun, yüksek oksijen ve karbondioksit geçiş oranlarına sahip liç çözeltilerinde elde edildiği belirlenmiştir (Torma, 1971).

4.2.3.1. Laboratuvar Şartlarında Uygulanan Biyoliç Teknikleri

4.2.3.1.1. Kolon Liçi

Kolon liçi, genellikle altın ve bakır gibi metallerin çıkarılması için kullanılan bir liç yöntemidir. Bu yöntemde, cevherler büyük kolonlara yerleştirilir ve üzerlerine liç çözeltisi püskürtülür. Liç çözeltisi, cevherdeki metal parçacıklarını çözerek, çözeltiye alır ve daha sonra işlenmek üzere toplanır. Bu işlem, basınçlı hava veya diğer fiziksel işlemler kullanılarak cevherin sıkıştırılması veya karıştırılması ile hızlandırılabilir. Kolon liçi, diğer liç yöntemlerine göre daha az yatırım ve işletme maliyeti gerektiren bir yöntemdir ve genellikle büyük ölçekli madencilik projelerinde tercih edilir. Kolonlar, cam, plastik, çelik, fiberglas veya betondan yapılmış olabilir ve boyutlarına göre değişebilir (Şekil 6).



Şekil 6. Kolon Liçi (Bosecker, 1997).

Cara ve ark. (2006) yaptıkları deneysel çalışmalarında, İspanyol kömürlerinden kükürt uzaklaştırmak için *Leptospirillum ferrooxidans* ve *Thiobacillus* mikroorganizmalarını kullanarak kolon liçi yöntemini uygulamışlardır. Yapılan 125 günlük biyodesülfürizasyon süreci sonrasında, piritik kükürdün %43 oranında uzaklaştırıldığını ve toplam kükürdün ise %24'e kadar azaltıldığını belirtmişlerdir.

Weerasekara ve ark. (2008) yapmış oldukları çalışmada, *Acidithiobacillus ferrooxidans* ve *Leptospirillum ferrooxidans* bakteri türlerini kullanarak kolon liçi yöntemiyle kükürdün uzaklaştırılmasını incelemek amacıyla bir model geliştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, piritik kükürdün %33 oranında azaltıldığı tespit edilirken, model tarafından yapılan tahmin %32 olarak hesaplanmıştır. Araştırmacılar, model sonuçlarının genel olarak deneysel verilerle iyi bir uyum gösterdiğini belirtmişlerdir.

Zhen ve ark. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, düşük tenörlü nikel içeren sülfür cevheri *Acidithiobacillus ferrooxidans* ve *Acidithiobacillus thiooxidans* bakterileri kullanılarak biyoliçi yöntemiyle araştırılmıştır. Bu çalışma, değerli metallerin düşük tenörlü nikel yatağından geri kazanılmasının teknik olarak fizibilitesini test etmeyi amaçlamaktadır. 312 günlük bir kolon liçi süreci (60 günlük asit ön liçi aşaması ve 252 gün biyoliçi aşaması) sonrasında %91 nikel ve %81 kobalt veriminin elde edildiği belirtilmiştir.

Ilyas ve arkadaşları (2010) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, elektronik atıklardan metallerin geri kazanımında *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* ve *Thermoplasma acidophilum* bakterileri kullanılarak kolon biyoliç yönteminin uygunluğu araştırılmıştır. Bakteri kültürlerinin, karışık metal iyonlarına (Ag^+ , Al^{+3} , Cu^{+2} , Fe^{+3} , Ni^{+2} , Pb^{+2} , Sn^{+2} ve Zn^{+2}) karşı toleransının, yaklaşık iki yıllık adaptasyon süreci sonunda 12 g/L'den 20 g/L'ye önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir. 27 günlük asit ön liç işlemi ve 280 günlük biyoliç işlemi dâhil olmak üzere tüm liç işlemi süresince yaklaşık %80 Zn, %64 Al, %86 Cu ve %74 Ni'nin çözüldüğü ifade edilmiştir.

Yang ve ark. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* ve *Leptospirillum ferrooxidans* bakteri türlerini kullanarak kolon liç yöntemiyle kükürt uzaklaştırmaya çalışmışlardır. Bu çalışmada, toplam kükürdün %28,66'sını uzaklaştırmayı başarmışlardır.

Çetinkaya (2020) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yüksek kül-kükürt içeren kömür numunelerinden piritik ve organik kükürdün uzaklaştırılması amacıyla ağır ortamda yıkama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra, ağır ortamda yıkanan temiz kömür örneklerine atmosferik basınç altında kolon liçi-biyoliçi deneyleri yapılmış ve son olarak bu yöntemlerin kombinasyonları uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda %4,40 kül ve %2,09 S içeren temiz kömür elde edilmiştir.

4.2.3.1.2. Karıştırma Liçi

Kolon liçinin O_2 teminindeki zorluklar ve yüzey oranlarındaki uyumsuzluk nedeniyle uzun süreler alması ve metal kazanımının düşük olması nedeniyle, karıştırma liçi ince taneli malzemeler için tercih edilen bir yöntemdir.

Bu yöntemde, cevherin ince taneli olarak öğütülmesi ve liç sırasında süspansiyon edilerek bir çalkalama cihazı veya karıştırıcı ile sürekli olarak çalkalanması sağlanır. Bu yöntemde, cevher yüzeyi kolon liçine kıyasla daha büyüktür ve reaksiyon alanı kimyasal ve biyokimyasal reaktifler için oldukça geniştir. Metal verimi, yüksek havalandırma hızı ve çeşitli parametrelerin kontrolü ile artırılabilir. Özellikle bakır cevheri için 100 gün sonra, karıştırma liçinde %80-85 oranında bir bakır kazanma liç verimi elde edilir iken kolon liçinde ise bu oran %1'e kadar düşebilir. Karıştırma liçi, düşük tenörlü cevherler, konsantreler, endüstriyel atık ürünleri ve kömürden sülfürün biyolojik işlemlerle uzaklaştırılması gibi alanlarda kullanılabilir. Bu nedenle, laboratuvar koşullarında karıştırma liçi, kolon liçine kıyasla daha uygun bir yöntemdir (Telefoncu, 1995). Bu teknikte, cevherin biyoliçe uygunluğu araştırılır ve uygun koşullarda ince öğütülmüş cevher liç çözeltisi ile karıştırılır. Karıştırma işlemi, genellikle Erlenmayer flask'ları veya biyoreaktörleri içerir. Karıştırma liçi, düşük tenörlü cevherler, konsantreler, endüstriyel atık ürünleri ve kömürden sülfürün biyolojik işlemlerle uzaklaştırılması gibi farklı alan-

larda kullanılabilir (Ebner, 1980).

Sarı (2005) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, metal sanayi atık çamurlarının ağır metal giderimi için asit liç, kimyasal liç, çalkalayıcıda biyoliç ve tam karışimli-kesikli reaktörde biyoliç yöntemleri uygulanmıştır. Bu yöntemler için pH, katı yükleme oranı ve bekletme süresinin liç işlemi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Yan-sheng ve ark. (2008) yapmış oldukları çalışmada kalkopiritin biyoliçi, *Acidithiobacillus ferrooxidans* ve karışık kültürler (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* ve *Leptospirillum spp.*) kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar, karışık kültürün daha verimli olduğunu göstermiştir. Karışık kültür kullanılması durumunda 75 günlük liç işlemi sonucunda bakır ekstraksiyonunun %46,27'ye, saf *Acidithiobacillus ferrooxidans* kullanıldığında ise bakır ekstraksiyon oranının %30,37 olduğu tespit edilmiştir.

Kaewkannetra ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, çinko cevherinin biyoliçi *Acidithiobacillus ferrooxidans* türü bakteri kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, kontrol deneyine kıyasla (*Acidithiobacillus ferrooxidans* olmadan) *Acidithiobacillus ferrooxidans*'ın çinkoyu 6 kata kadar başarıyla süzebildiği ve maksimum verimin %92,3 elde edildiği ifade edilmiştir.

Karimi ve arkadaşları (2010) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kalkopirit cevherinden bakırın kazanımı, *Acidithiobacillus ferrooxidans* bakterisi kullanılarak araştırılmıştır. Bakır liçinde çözünür demirin varlığı ve oksidatif durumunun, pH ve sıcaklık ile yakından ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu faktörlerin, bakırın verimli bir şekilde çözünmesinde belirleyici olduğu bulgulanmıştır.

Liu ve ark. (2017) Çin linyit kömürlerinden kükürdün biyolojik yöntemlerle uzaklaştırılması için *Acidithiobacillus ferrooxidans* ve *Pseudomonas sp.* bakterilerini kullanarak çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, *Acidithiobacillus ferrooxidans* ve *Pseudomonas sp.* mikroorganizmalarının kullanımıyla linyit kömürünün toplam kükürt içeriği sırasıyla %5,12'den %2,76'ya ve %3,23'e düşürülmüştür. Ayrıca, linyit kömürünün kalorifik değerinin 6.219 cal/g'dan 6.406 cal/g'ye ve 6.315 cal/g'a yükseldiği belirtilmiştir.

Wang ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, bakır cevherinin biyoliçi araştırılmıştır. *Leptospirillum ferriphilum* ve *Acidithiobacillus ferrooxidans*'ın bakır liçinde etkili olduğu ifade edildi.

Palanivel ve ark. (2023) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, maden topraklarındaki metale toleranslı mantarların kullanıldığı biyoremediasyon işleminin umut verici, maliyet açısından uygun ve çevre dostu bir yaklaşım olarak değerlendirildiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, terk edilmiş bir arazinin topraklarından izole edilen *Aspergillus hiratsukae* LF1 ve *Aspergillus terreus*

LF2 mantar türleri kullanılarak bakır giderim verimliliği ve biyobirikim yeteneği değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, *Aspergillus terreus* LF2'nin bakırın biyolojik ıslahı için umut vaat ettiği ifade edilmiştir.

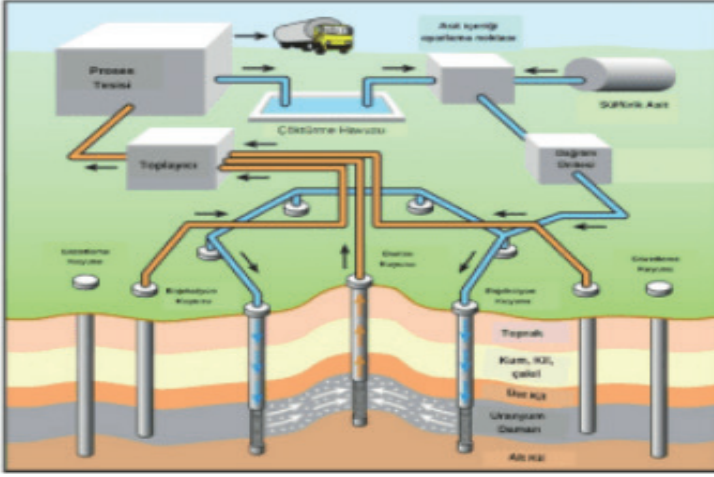
4.2.3.2. Endüstriyel Biyoliç Teknikleri

Endüstriyel liç yöntemleri genellikle düşük tenörlü cevherlerin işlenmesinde tercih edilir. Bu yöntemlerde, cevher yığınlar halinde depolanır ve liç çözeltisi püskürtme sistemiyle yığının üzerine püskürtülür. Yığının altından süzülen zenginleştirilmiş liç çözeltisi toplanır. Bu uygulama, özellikle bakır ve uranyum cevherleri için kullanılır (Navake, 1986; Bosecker, 1997).

Endüstriyel liç işlemlerinde; yerinde, tank, dökme ve yığın biyoliçi olarak 4 ana gruba ayrılabilir. Biyomadencilikte sürekli karıştırılmalı tank reaktörleri hem biyoliçte hem de biyooksidasyon işlemlerinde kullanılmaktadır (Gahan ve ark. 2012).

4.2.3.2.1. Yerinde Liç

Yerinde liç işlemi genellikle terkedilmiş maden ocaklarında uygulanır. Klasik madencilik faaliyeti bitirilmiş olan galeriler, su ile doldurulur ve galerilerin dibinde biriken su yüzeye pompalanır. Genellikle düşük tenörlü cevherler ekonomik veriler de göz önüne alınarak geleneksel madencilik yöntemleriyle zenginleştirilemezler. Ancak yerinde liç işlemi bu tip madenler için bir potansiyel değerlendirme yöntemi olmaktadır. Uygun bakteri içerikli liç çözeltisi açılan sondaj deliklerinden çatlaklı cevher yatağına enjekte edilir. Reaksiyonun gerçekleşebilmesi için yeterli zaman geçtikten sonra kuyularda toplanan yüklü çözelti yeryüzüne pompalanır. Yerinde liç yöntemi kullanıldığında, toprağın altındaki su kaynaklarının ve yeraltı su kalitesinin korunabilmesi için yan taş (gang) kayacının geçirimsiz, cevherin ise yeterli oranda geçirimli tabakalardan oluşması gerekmektedir. Bu yöntemde, yüklü çözeltinin sızmasını önlemek için özel önlemler alınması gereklidir. Yerinde liç işleminin şematik görünümü Şekil 5'de gösterilmiştir. Örneğin uranyum kazanılması, çözünmeyen uranyum cevherlerinin bakteriler tarafında üretilen ferik demir ve sülfürik asit ile çözünebilir sülfatlara dönüştürülmesi ile gerçekleşir (Siddiqui ve ark. 2009).



Şekil 7. Yerinde (In-Situ) Biyoliçin Şematik Görünümü (URL-4).

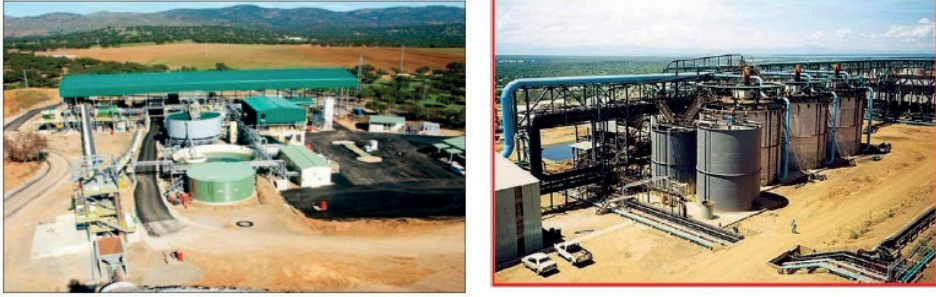
4.2.3.2.2. Tank Liçi

Biyoreaktörler, metal kazanımının yüksek olması sebebiyle karıştırma liçi gibi laboratuvar ölçekli liç uygulamalarının endüstriye uyarlanmasına olanak sağlamıştır. Bu yöntem, bakterisiz su ve hava ile gerçekleştirilen doğal liç işlemine oranla 500.000 kat daha hızlı gerçekleşmektedir ve uygulama işlemi; karıştırma, havalandırma ve pH gibi ortam şartları kontrol edilebilen tanklarda gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem ile sülfürlü çinko konsantrasyonlarından %80 civarında çinko metal kazanımı elde edilmiştir. Altın cevherlerinin biyoliçinde de başarılı bir şekilde uygulanabilen tank liçi, yığın ve yerinde liç tekniklerine göre daha pahalıdır ancak metal kazanım oranı daha yüksektir (Bosecker, 1997). Şekil 8'de tank liçinin şematik görünümü verilmektedir.



Şekil 8. Tank Biyoliçinin Görünümü (URL-5).

BHP Billiton Ltd. şirketi tarafından sülfütlü metal nikel ile bakır ve çinko kazanımı için karıştırmalı tank biyoliçi için pilot tesis kurulmuştur. Birçok araştırmacı, laboratuvar ölçekli çinko sülfitlerin biyoliç ile kazanımını araştırmıştır ve düşük ölçekli çinko sülfid cevherlerinden pilot tesis ile çinko kazanımı yapılmıştır. Uganda'daki Kasese Kobalt Kilembe madeninde, 1956-1982 yılları arasındaki stoklanmış olan piritik demirli kobalt artıklarından, ticari karıştırmalı tank işlemeyle kobalt kazanımı yapılmaktadır (Şekil 9). Proses, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) tarafından Fransa'da geliştirilmiştir (Gahan ve ark. 2012).



Şekil 9. Uganda'daki Kasese Madenindeki Pirit Artıklarından biyoliç ile Kobalt Kazanımı (Gahan ve ark. 2012).

Cameron ve ark. (2009) tarafından düşük tenörlü nikel sülfid cevheri üzerinde pH'ın biyoliç yöntemi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 5 haftalık karıştırmalı tank biyoliç deneyleri, pH'ın (2-6) nikel üzerindeki etkisini incelemek için 30 °C'de ince öğütülmüş cevher (<0,147 mm) ile gerçekleştirilmiştir. Biyoliç işleminin ilk üç haftasında, pH değeri ≤ 5 olan deneylerde, nikelin %70'ten fazlasının benzer oranlarda çözündüğü gözlemlenmiştir.

Ahmedi ve ark. (2010) tarafından yapılan bir araştırmada, yüksek tenörlü kalkopirit cevherleri ve flotasyon konsantrelerinden bakır kazanımı için elektrokimyasal biyoliç yöntemi incelenmiştir. İran'ın güneydoğusunda bulunan Sarcheshmeh bakır işleme kompleksinden alınan bir flotasyon konsantresi ve karışık mezofilik ve orta derecede termofilik mikroorganizmalar kullanılarak karıştırmalı bir biyoreaktörde liç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, biyolojik liç sonuçları ile elektrokimyasal biyolojik liç testlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan, kalkopirit flotasyon konsantresinin elektrokimyasal biyolojik liç ile geleneksel biyolojik liçe kıyasla yaklaşık %35 daha fazla bakır kazanımına yol açtığı belirlenmiştir. Bu artışın ana nedeni, redoks potansiyelinin 400 ila 425 mV arasında kontrol edilmesidir. Bu koşul altında, kalkopirit yüzeyinde demir oksidasyon ürünlerinin çökmesini engelleyen ve bir difüzyon bariyeri olarak hareket edebilen bir etki gözlenir. Bu durum, kalkopiritin daha iyi elektrokimyasal indirgenmesine ve çözünmesine yol açtığını ifade etmişlerdir.

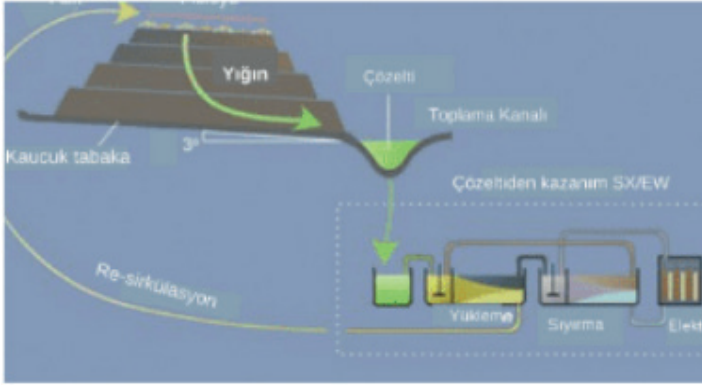
Zhang ve Schippers (2022), Şili'deki maden atıklarından kobalt ve bakırın biyoliçi için, mezofiller ve orta dereceli termofillerin kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, kobalt ve bakırın biyoliçi işlemi çalkalama şişeleri ve karıştırmalı tank reaktörlerinde uygulanmıştır. Araştırmacılar, orta derecede termofillerin, mezofillerden daha yüksek bir biyoliç performansı sergilediğini ve %74'e kadar kobalt, neredeyse %100 bakır ekstraksiyonu elde edildiğini belirtmişlerdir.

4.2.3.2.3. Yığın Liçi

Yığın liç, eski bir liç işlemidir ve genellikle açık ocak madenciliği ile çıkarılan düşük tenörlü cevherlerin işlenmesinde kullanılır. Bu yöntemde, öncelikle liç yapılacak alan, asfalt, çimento veya kil gibi malzemelerle kaplanarak sızıntı önlenir. Yığınların yüksekliği genellikle 10-20 m, boyu 100-200 m ve eni 40-50 m civarındadır ve yaklaşık 100.000 ton cevher içermektedir. Bu boyutlar havalandırmayı kolaylaştırmaktadır (Telefoncu, 1995).

Yığın üzerine sürekli olarak liç çözeltisi püskürtülür veya geçici olarak liç çözeltisi ile doldurulur ve ardından sıvı çözelti üzerlerine dökülür. Liç edilecek cevhere bağlı olarak liç çözeltisi asitli su veya ferrik sülfat çözeltisi olabilir.

Süzülmüş liç sıvısı, sirkülasyondan önce bir oksidasyon havuzundan geçirilerek bakteri ve ferrik demirin tekrar üretilmesi sağlanır ve tekrar yığına pompalanır. Yığın liçi yavaş bir işlemdir ve genellikle 10-20 yıl kadar sürebilir. Ancak basit, ucuz ve az çalışma gerektiren bir uygulamadır. Yığın liçinin şematik görünümü Şekil 10'da gösterilmiştir (Bosecker, 1997; Navake, 1986).



Şekil 10. Yığın Biyoliçinin Şematik Görünümü (URL-4).

Yığın liçi 1600'lü yıllardan beri İspanya, Almanya, İsveç ve Çin'de yapılmaktadır. En eski biyoliç uygulaması güneybatı İspanya'daki Rio Tinto madeninde yapılmıştır. 1890 yılının başlarında, düşük tenörlü bakır cevherleri 1-3 yıl arasında doğal bozundurmaya bırakılmıştır. Buna karşılık, bu uygulama birkaç on yıl, korunmuştur. Son zamanlara kadar, mineral çözüldürücü

bakterilerin katkısı kanıtlanmamıştı. İlk olarak demir (II) oksitleyici olarak *Acidithiobacillus ferrooxidans* 1951 yılında bulunmuştur. Buna ek olarak, 1961 yılında Rio Tinto madeni liç içerisinde *Acidithiobacillus ferrooxidans*'sı bulmuştur. Biyohidrometalurjinin ticari uygulamalarında (buna biyoliçde dâhil) yavaş bir ilerleme olmuştur. 1970 yılında, Lacey ve Lawson *Acidithiobacillus ferrooxidans* ile demir (II) oksidasyonunun, biyolojik olmayan çözünmüş oksijen ile kimyasal oksidasyonuna göre daha hızlı olduğu raporlamıştır. Buna benzer bir çalışmada, yığın ile bakır liçi 1980 yılında başlatılmış ve bu zamandan sonra, birçok bakır yığın biyoliç tesisi kurulmuştur. Yığın biyoliçi sülfür minerallerde temel metal kazanımında hızla gelişmekte olan bir teknolojidir. Son yıllarda, yığın biyoliçinde önemli gelişmeler olmuştur. Yığın biyoliçi düşük tenörlü %1-3 bakır içeren cevherlerden ve kovellin (CuS) ve kalkosin (Cu₂S) gibi ikinci dereceli bakır sülfür minerallerinden yapılmaktadır (Şekil 11). Bakır biyomadenciliği suda çözünmeyen bakır sülfürleri suda çözülebilen bakır sülfürlere dönüştürmeye bağlıdır. Yığın liçinde, sülfürlü cevherler kırılıp, sülfürik asit ile aglomere edilerek liç yapılacak alanda istiflenmektedir. Liç sırasında havalandırması yığının alt kısmından yapılmaktadır. Sonrasında, cevher 1-6 hafta kütleme için bırakılmakta ve sonrasında asidik liç solüsyonuyla 400-600 gün daha liç işlemi yapılmaktadır (Gahan ve ark. 2012). Cevherin yüzeyinde ve çözelti içerisinde büyüyen bakteriler, katalize ederek bakırı serbest hale getirirler. Bakteriler tarafından üretilen ferik demir bakır sülfat üretiminde önemli rol oynar (Siddiqui ve ark. 2009).



Şekil 11. Bakır Yığın Biyoliçi (Gahan ve ark. 2012).

Bakır biyomadenciliği sonrasında %75-95 bakır metal kazanımı olmaktadır. Yığın reaktörlerinin kurulması ucuz ve üretim aşaması kolaydır. Düşük tenörlü cevherlerin kazanımında bu yöntem tercih edilmektedir (Şekil 12) (Gahan ve ark. 2012).



Şekil 12. Uganda'daki Bakır Biyomadenciliği (Gahan ve ark. 2012).

Dünyadaki, bakır yığın biyoliçi üretimi yapan başlıca tesisler Çizelge 3'de verilmiştir.

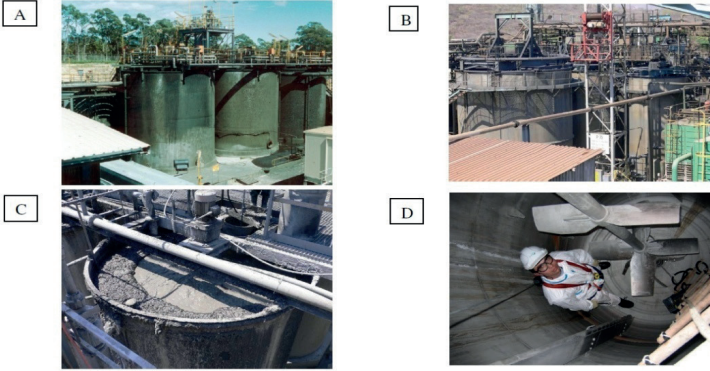
Çizelge 3. Dünyada Faaliyet Gösteren Endüstriyel Bakır Yığın Biyoliçi İşletmeleri (Watling, 2006).

Endüstriyel tesis ve konum / sahibi	Kapasite (ton/yıl - Cu)	İşletme durumu
Lo Aguirre, Şili / Sociedad Minera Pudahuel	15,000	1980-1996
Mount Gordon (Formerly Gunpowder), Avustralya / Aditya Birla	33,000	1991-2008
Mt Leyshon, Avustralya (Formerly Normandy Poseidon)	750	1992-1995
Cerro Colorado, Şili / BHP Billiton	115,000	1993-
Girilambone, Avustralya / Straits Resources & Nordic Pacific	14,000	1993-2003
Ivan-Zar, Şili / Compañía Minera Milpro	10,000-12,000	1994
Punta del Cobre, Şili / Sociedad Punta del Cobre	7,000-8,000	1994-
Quebrada Blanca, Şili / Teck Resources	75,000	1994-
Andacollo Cobre, Şili / Teck Resources	21,000	1996-
Dos Amigos, Şili / CEMIN	10,000	1996-
Zaldivar, Şili / Barrick Gold	150,000	1998-
Lomas Bayas, Şili / Xstrata	60,000	1998-
Cerro Verde, Peru / Freeport McMoran	54,200	1997-
Lince II, Şili / Antofagasta Plc	27,000	2009 da kapatıldı
Monywa, Myanmar / Myanmar No.1 Mining Enterprise	40,000	1998-
Nifty Copper, Avustralya / Aditya Birla	16,000	1998-
Morenci, Arizona / Freeport McMoran	380,000	2001-
Lisbon Valley, Utah / Constellation Copper	27,000 planlanan	2006-
Jinchuan Copper, Çin / Zijin Mining Group	10,000	2006-2009
Spence, Şili / BHP Billiton	200,000	2007-
Whim Creek and Mons Cupri, Avustralya strait Resources	17,000	2006-
Skouriotissa Copper, Kıbrıs / Hellenic Copper	8,000	1996-

Biyomadencilik genellikle yığın liçi halinde (Şekil 13) veya karıştırmalı tank reaktörlerinde (Şekil 14) gerçekleştirilmektedir.



Şekil 13. Meksika'daki yüksek sıcaklık yığın liçi (Gahan ve ark. 2012).



Şekil 14. A-B: Sürekli karıştırmalı tank reaktörleri, C: Sürekli karıştırmalı tank reaktörünün üstten görünüşü, D: Sürekli karıştırmalı tank reaktörünün içinin görünüşü (Gahan ve ark. 2012).

Kremser ve ark. (2020), ömrünü tamamlamış araçların parçalanmasından sonra metallerin geri kazanımı için bir biyoliç işlemi geliştirmek amacıyla iki deneysel yaklaşım olan yığın ve karıştırmalı tank reaktörünü test etmiştir. *Acidithiobacillus ferrooxidans* ve *Leptospirillum ferrooxidans* gibi organizmalar deneysel çalışmada kullanılmıştır. Araştırmacılar, biyolojik liçin kimyasal liçe kıyasla çok daha yüksek bir verim sunduğunu ifade etmişlerdir.

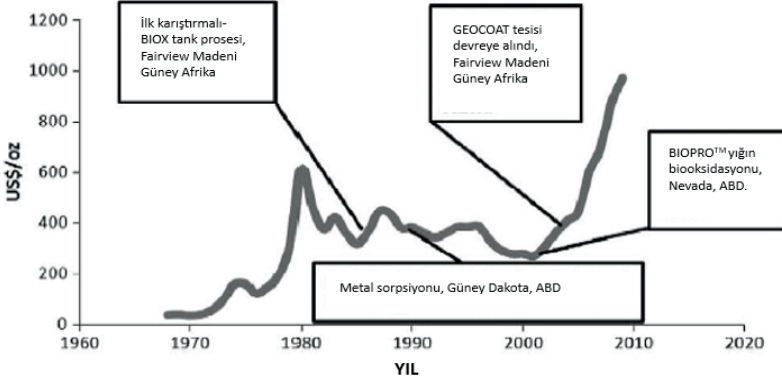
4.2.4. Biyomadencilikteki Sıkıntılar

Biyomadencilikte iyi bir şekilde havalandırılmış ve dikkatli bir şekilde yapılan karıştırmalı tank biyoreaktörleri çok etkindir. Mineral ayrışması, karıştırmalı tank biyoreaktörlerinde günler sürerken, çözeltinin, cevherin üzerinden beslendiği tip sistemlerde ise haftalar veya hatta aylarca sürmektedir. Bunun yanı sıra, karıştırmalı sistemlerde daha ayrıntılı mühendislik kontrolü gereklidir ve solüsyonun cevherin üzerinden beslendiği tip sistemlere göre üretim maliyeti daha fazladır. Ayrıca tank içinde verimli havalandırma elde etmek zordur ve en büyük üretim maliyetine de havalandırma ekipmanları neden olur. Bu sistemlerin diğer bir önemli kısıtlaması da yaklaşık ola-

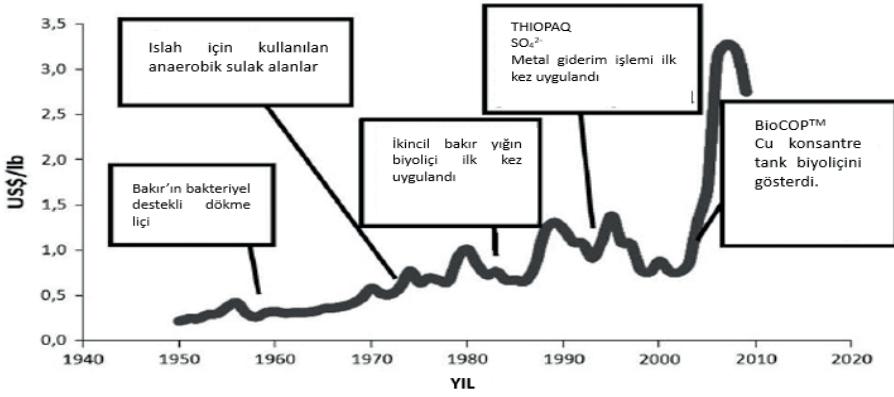
rak %20 oranında pülp (bulamaç) yoğunluğunda çalışılması gerekmektedir. Ortam katı oranının bu katı oranından daha fazla olması durumunda havalandırma zorlaşmakta ve mineral liçi yapan mikroorganizmalar karıştırma sırasında pervaneler tarafından zarar görmekte ve böylelikle sistemin liç verimi etkilenmektedir. Tank veya yığın biyoliçinin uygulandığı proseslerde cevherdeki metal kazanımından mikroorganizmaların ürettiği ferrik demir çözeltisi sorumludur. Büyük hacimli yığınların içerisine yüksek miktarda oksijen göndermek kolay olmayan bir işlemdir. Yığının iç ısısını ölçmek ve kontrol etmek güçtür. Bu durum; yığın yüksekliği, çevresel sıcaklık, cevher üzerinden solüsyonun verilme şekli ve havalandırma gibi birçok faktöre bağlıdır. Ayrıca, cevher yatağındaki sülfürlü mineral içeriğinde sıcaklığı etkiler, daha çok sülfür içeriği, yığının içerisinde daha yüksek sıcaklığa neden olur. İç ortam sıcaklığının 65-80 °C arasında olması beklenmedik bir durum değildir. Eğer, sülfür içeriği çok düşük olursa, yeterince hızlı metal çözünmesi için yeterli sıcaklığa yığın içinde ulaşılamaz. Bu durumda da yığın biyoliçi ekonomik olmaz.

4.2.5. Metal Fiyatlarının Biyomadencilğe Etkisi

Metal fiyatlarındaki düşüş üretim maliyetlerinin artırmakta ve çoğunlukla üretim kısıtlanmaktadır. Böylece maden planları değişerek daha yüksek metal rezervi hedeflenmektedir. Araştırma ve geliştirme harcamaları azaltmakta ve bazı mühendisleri işten çıkartılabilmektedir. Maden üretimi ve metal iyileştirmede biyohidrometalurjik prosesler rekabetçi teknolojilere göre daha düşük ilk yatırım ve üretim maliyeti vardır. Şekil 15-16'da biyomadencilğin başladığı zamandan itibaren altın ve bakır fiyatlarındaki değişimin biyohidrometalurjide nasıl rol oynadığını göstermektedir. Altın ve bakırın seçilmesinin sebebi bu metallerin günümüzde tam kapasiteli tesislerde ticari olarak kullanıldığından dolayıdır. Grafikte, biyohidrometalurji ticari tesisleri kurulmadan yaklaşık 10 yıl öncesinden itibaren bazı önemli gelişmeler görülmektedir. Şekil 15-16'dan görüldüğü gibi biyohidrometalurjik yenilikler düşük metal fiyatlarını olduğu zamanlarda olmaktadır, bu madencilik firmalarının biyometalurjik işlemleri uygulamada daha stabil metal fiyatlarını tercih ettiği şeklinde yorumlanabilir (Brierley, 2010). BioCOP teknolojisinin geliştirildiği dönemde bakır fiyatlarının hızla arttığı görülmektedir. Teknolojinin gelişmemesinde en önemli faktör artan bakır fiyatıdır. Metal fiyatları biyohidrometalurjik proses uygulamaları için tek neden değildir. Diğer nedenler, üretim maliyetleri ki bunlar; enerji gideri, madencilik, zenginleştirme ve çevresel giderlerin artmasıdır. Bazı biyohidrometalurjik metotlar alternatif metotlara göre daha az enerji ile çalışabilirler. Sülfürik asit maliyeti, talebe ve yere bağlı olarak değişken olabilir, buna karşın biyoliç işlemi aynı şartlar altında, asit alımlarını ortadan kaldırmakta veya azaltmak için yerinde asit üretimi yapmaktadır.



Şekil 15. Toplam Ortalama Altın Fiyatları (dolar olarak) (US\$/oz) ve 1968-2009 Yılları Arasında Biyohidrometalurji Alanındaki Önemli Gelişmeler (Brierley, 2010).



Şekil 16. Ortalama Bakır Fiyatı (US\$/lb) ve 1950-2008 Yılları Arasında Biyohidrometalurji Alanındaki Önemli Gelişmeler (Brierley, 2010).

5. BİYOMADENCİLİK ALANINDA GELECEK BEKLENTİLERİ

Biyomadencilikte; biyohidrometalurji ve biyomineral işlemleri dünyadaki çevre problemlerinin yükselmesiyle beraber önemli bir rol almaya başlamıştır. Küçük rezervli madenler için metalleri çıkarma sürecinde ve kirli sanayi alanlarının iyileştirmeyi içeren zorluklarda yüksek finansal yatırımlar gerektirmeyen biyomadencilik ekonomik ve teknik olarak uygulanabilir bir teknoloji olma eğilimindedir. Bazı metaller için ticari uygulamalar yapılabılırken bazı teknik sorunlar hala araştırılmaktadır. Sülfürlü refrakter altın konsantrelerinin biooksidasyon ile ön zenginleştirilmesi başarılı bir şekilde yapılmaktadır. Ayrıca, ikincil sülfürlü bakır ve nikellerin, karıştırmalı tank reaktörleri, dökme ve yığın biyoliçileri ile yapılabilmektedir. Bunların yanı sıra, düşük tenörlü kalkopirit ve uranyum cevherlerinin yığın biyoliçi ile kazanılmasında önemli gelişmeler ve araştırmalar yapılmaktadır. Biyo-

madencilik alanında birçok fırsat henüz gün yüzüne çıkmamıştır. Örneğin siyah şist ve sülfürlü çinko cevherlerinin ticari olarak biyoliçindeki gelişmeler tamamlanmamıştır. Yerinde biyoliç ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir. Biyohidrometalurji ve Biyomadencilik alanında birçok ülkede, metal sülfürlerin işlenmesinde hem tam kapasiteli işletmeler hem de pilot tesislerin ekonomik olduğu kanıtlanmıştır. Aynı zamanda biyomadencilik hem çevreye duyarlı hem de ekonomik bir yöntemdir. Biyohidrometalurjik yöntemler, özellikle refrakter tip altın konsantrelerinde ön işlem olarak kavurma yönteminin yerini almaktadır. Bu kavurmanın yerine geçme Çin gibi ülkelerde göstermektedir ki bu yöntem gelecek vaat etmektedir. Biyohidrometalurjik yöntemler uygulama sonrası açığa çıkan atıklar daha az ve stabil olmaktadır. Maden sahasında bulunan düşük tenörlü cevherlerin kazanılmasında diğer yöntemlere göre daha avantajlı olmaktadır. Bazen birden fazla metal içeren karmaşık cevherlerin yüksek tenörlü olarak flotasyon ile kazanılması zordur bu yüzden flotasyon öncesinde biyoliç işlemi ile flotasyona yardımcı olunarak metal kazanma verimi artırılmaktadır. Endüstrideki gelişme ve araştırmalar gösteriyor ki gelecekteki günlerde düşük tenörlü cevherlerden yığın biyoliçi, tank biyoliçi ve biyooksidasyon yöntemi sayesinde maden ve mineral sanayisinde büyük teknolojik avantajların olması beklenmektedir (Brierley, 2010).

6. BİYOTEKNOLOJİDEKİ GELİŞMELERİN TÜRKİYE'DEKİ DURUMU

Biyoteknoloji, Türkiye'de son yıllarda önemli bir alan haline gelmiştir. Ülke genelinde biyoteknoloji araştırmalarına ve uygulamalarına yönelik birçok gelişme yaşanmaktadır. Türkiye'de madencilik sektöründe ise biyoteknolojinin kullanımı hala çok sınırlıdır ve daha da gelişme potansiyeline sahiptir. Dünya biyoekonomisindeki Türkiye'nin payını artırmak için hem mevcut hem de yeni girişimlerin devlet ve/veya özel sektör tarafından teşvik ve desteklenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, güçlü bir program ve yol haritası hazırlanması büyük önem taşımaktadır (URL-8).

KAYNAKÇA

- (URL-1) <https://tr.wikipedia.org/wiki/Biyoli%C3%A7>
- (URL-2) www.reb-gold.com
- (URL-3) www.maden.org.tr
- (URL-4) <https://www.turkchem.net/cevher-hazirlama-ve-kimyasal-zenginlestirme-yontemleri.html>
- (URL-5) <http://jinshibaomachine.com/en/product/items.php?nid=36&id=130>
- (URL-6) https://personel.omu.edu.tr/docs/ders_dokumanlari/9198_39298_2165.pptx
- (URL-7) <http://blog.coralwonders.com/en/bacterias-en-el-acuario-marino/thiobacillus-thiooxidans/>
- (URL-8) https://tasam.org/Files/Etkinlik/File/VizyonBelgesi/BTR_B_Vizyon_TR_pdf_9ca30c8335aa-4b45-abdc-d8923e708646.pdf
- AHMADI, A., SCHAFFIE, M., MANAFI, Z., RANJBAR, M., 2010. Electrochemical Bioleaching of High Grade Chalcopyrite Flotation Concentrates in A Stirred Bioreactor. *Hydrometallurgy*, 104. pp: 99–105.
- AHONEN, L., TUOVINEN, O.I., 1989. Microbiological Oxidation of Ferrous Iron at Low Temperatures. *Appl. Environ. Microbiol.*, 55, 312–316.
- BOSECKER, K., 1997. Bioleaching: Metal Solubilization by Microorganisms, *FEMS Microbiology Reviews*.
- BRIERLEY C.L., 2010. Management in Action-Biomining: Biomining Beckons. *Mining Magazine*.
- BRANDL H., 2001. *Microbial Leaching of Metals*: Zürich, Switzerland.
- CAMERON, R. A., LASTRA, R., MORTAZAVI, S., BEDARD, P. L., MORIN, L., W. DOUGLAS GOULD, KEVIN J. KENNEDY, 2009. Bioleaching of A Low-Grade Ultramafic Nickel Sulphide Ore in Stirred-Tank Reactors at Elevated Ph. *Hydrometallurgy*, 97, pp:213–220.
- CARA, J., VARGAS, M., MORAN, A., GOMEZ, E., MARTINEZ, O., GARCIA, F., 2006. Biodesulphurization of a Coal by Packed-Column Leaching. Simultaneous Thermogravimetric and Mass Spectrometric Analyses. *Fuel*, 85, 1756.
- ÇETİNKAYA, Z., 2020. TKİ (ÇAN) Linyitlerinin Karakterizasyonu Ve Kükürt Gideriminin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-Doktora Tezi, 234s.
- CHEN, S. Y., LIN, J. G., 2000. Influence of Solid Content on Bioleaching of Heavy Metals From Contaminated Sediment By *Thiobacillus Spp*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 75: 649-656.

- DAVID S. HOLMES D.S., BONNEFOY V., 2007. Genetic and Bioinformatic Insights into Iron and Sulfur Oxidation Mechanisms of Bioleaching Organisms.
- DRESHER W.H., 2004. Producing Copper Nature's Way: Bioleaching, CWD: INNOVATIONS, May issue, 10.
- EBNER, H.G., 1980. Bacterial Leaching in an Airlift Reactor. In: Proceedings of the International Conference on Use of Microorganisms in Hydrometallurgy. pp: 211-217.
- GAHAN C.S., SRICHANDAN H., KİM D. J. ve AKCİL A., 2012. Biohydrometallurgy and Biomineral Processing Technology: A Review on its Past, Present and Future.
- GOLDFIELDS, 2008. Gold Fields Limited. BIOX Brochure.
- HUTCHINS, S.R., DAVIDSON, M.S., BRIERLEY, J.A., BRİERLEY, C.L., 1986. Microorganisms in Reclamation Of Metals, Annu. Rev. Microbiol., 40, 311- 336.
- ILYAS, S., RUAN, C., BHATTI, H.N., GHOURI, M.A., ANWAR, M.A., 2010. Column Bioleaching of Metals From Electronic Scrap. Hydrometallurgy. 101. pp:135–140.
- KAEWKANNETRA, P., GARCIA-GARCÍA F. C., and CHIU, T. Y., 2009. Bioleaching of Zinc From Gold Ores Using *Acidithiobacillus Ferrooxidans*. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 16, pp: 368.
- KARIMI, G. R., ROWSON, N. A., HEWITT, C. J., 2010. Bioleaching of Copper Via Iron Oxidation From Chalcopyrite at Elevated Temperatures. Food And Bioproducts Processing. 88. pp: 21–25.
- KELLY, D.P., HARRISON, A.P., 1989. Genus Thiobacillus Beijerinck. In: Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. (Staley, J.T., Bryant, M.P., Pfenning, N., Holt, J.G., -eds.), Vol. 3, pp.1842-1858, Williams and Wilkins Co, Baltimore.
- KREMSER, K., THALLNER, S., SCHOEN, H., WEISS, S., HEMMELMAİR, C., SCHNİTZHOFER, W., ALDRIAN, A., GUEBITZ, G. M., 2020. Stirred-Tank and Heap-Bioleaching of Shredder-Light-Fractions by *Acidophilic Bacteria*. Hydrometallurgy, 193, 105315.
- LEDUC, L.G., FERRONI, G.D., 1994. The Chemolithotrophic Bacterium *Thiobacillus Ferrooxidans*. FEMS Microbiol. Rev., 14, 103-120.
- LIU, T., HOU, J. H., PENG, Y. L., 2017. Effect of a Newly Isolated Native Bacteria, *Pseudomonas sp.* NP22 on Desulfurization of the Low-Rank Lignite. International Journal of Mineral Processing 162: 6–11.
- LIZAMA, H.M., SUZUKI, I., 1988. Bacterial Leaching of A Sulfide Ore by *Thiobacillus Ferrooxidans* and *Thiobacillus Thiooxidans*: I. Shake Flask Studies. Biotechnol. Bioeng., 32, 110-116.
- NAVAKE, R., 1986. Bacterial Leaching of Ores and Other Materials, Institut für Mikrobiologie, Technische Universtat Braunschweig, Fed. Rep. Germany.
- PALANIVEL, T. M., PRACEJUS, B., NOVO, L. A. B., 2023. Bioremediation of Copper

- Using Indigenous *Fungi Aspergillus* Species Isolated From An Abandoned Copper Mine Soil. *Chemosphere*, 314, 137688.
- PIETER C. V. A, JAN V. N, WALDEMAR O., 2007 The BIOX™ Process for the Treatment of Refractory Gold Concentrates.
- PRONK, J.T., DE BRUYN, J.C., BOS, P., KUENEN, J.G., 1992. Anaerobic Growth of *Thiobacillus Ferrooxidans*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 58, 2227-2230.
- RAWLINGS D.E., DEW D. And DU PLESSIS C., 2003. Biomineralization of Metal-Containing Ores and Concentrates, *Trend. Biotechnol.*, 21, 38-44.
- RAWLINGS D.E., JOHNSON B.D., 2006 *Biomining*.
- SAND, W., GEHRKE, T., JOZSA, P.G., SCHIPPERS, A., 1999. Direct Versus Indirect Bioleaching. In: *Biohydrometallurgy and the Environment Toward the Mining of the 21st Century*.
- SARI, B., 2005. Metal Sanayi Atık Çamurlarından Ağır Metal Gideriminde Biyoliç Yönteminin Kullanılması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-Yüksek Lisans Tezi, 110s.
- SEVER, E., BAYAT, O., 2008. İskenderun Demir Çelik Fabrikası Atık Çamuruna Biyoliç Uygulaması. Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, 17-5.
- SIDDIQUI M. H., KUMAR A., KESARI K. K., ARIF J.M., 2009 *Biomining - A Useful Approach Toward Metal Extraction*.
- SILVERMAN, M.P., LUNDGREN, D.G., 1959. Studies on The Chemoautotrophic Iron Bacterium *Ferrobacillus Ferrooxidans*. *J. Bacteriol.*, 77, 642-647.
- SUZUKİ, I., TAKEUCHI, T.L., 1992. Oxidation of Elemental Sulfur to Sulfite by *Thiobacillus Thiooxidans* Cells. *Appl. Environ. Microbiol.*, 58, 3767-3769.
- TELEFONCU, A., 1995. *Biyoteknoloji*, Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları, No:152, İzmir.
- TEMPLE, K.L., COLMER, A.R., 1951. The Autotrophic Oxidation of Iron By A New Bacterium: *Thiobacillus Ferrooxidans*. *J. Bacteriol.*, 62, 605-611.
- TUOVINEN, O.H., KELLY, D.P., 1972. Biology of *Thiobacillus Ferrooxidans* in Relation to the Microbiological Leaching of Sulfide Ores, *Z. Allg. Mikrobiol.*, 12, 311.
- TORMA, A.E., 1971. Microbiological Oxidation of Synthetic, Cobalt, Nickel and Zinc Sulfides by *Thiobacillus Ferrooxidans*. *Rev. Can. Biol.*
- TRIBUTSCH, H., 2001. Direct Versus Indirect Bioleaching. *Hydrometallurgy*, 59, 177-185.
- WANG, X., MA, L., WU, J., XIAO, Y., TAO, J., LIU, X., 2020. Effective Bioleaching of Low-Grade Copper Ores: Insights From Microbial Cross Experiments. *Biore-source Technology*. 308, 123273.
- WATLING, H. R., 2006. *The Bioleaching of Sulphide Minerals with Emphasis on Copper Sulphides A Review*, *Hydrometallurgy*.
- WEERASEKARA, N. S., GARCI FRUTOS, F. C., CARA, C., LOCKWOOD, F. C.,

2008, Mathematical Modelling of Demineralisation of High Sulphur Coal by Bioleaching. *Minerals Engineering* 21: 234–240.

YAN-SHENG, Z., WEN-QING, Q., JUN, W., SHI-JIE, Z., CONG-REN, Y., JIAN-WEN, Z., SHAO-SHI, N., GUAN-ZHOU, Q., 2008. Bioleaching of Chalcopyrite by Pure And Mixed Culture. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 18. pp:1491-1496.

YANG, Y., REN, G., WANG, X., YANG, L., 2012. Experimental Research on Coal Bio-desulfurization by Mixed Culture Column Leaching. *Advanced Materials Research*, 512-515, 2500-2504.

ZHANG, R., SCHİPPERS, A., 2022. Stirred-Tank Bioleaching of Copper and Cobalt From Mine Tailings in Chile. *Minerals Engineering* 180, 107514.

ZHEN, S., YAN, Z., ZHANG, Y., WANG, J., CAMPBELL, M., QİN, W., 2009. Column Bioleaching of A Low Grade Nickel-Bearing Sulfide Ore Containing High Magnesium As Olivine, Chlorite And Antigorite. *Hydrometallurgy.* 96: pp: 337–341

Bölüm 6

EEG SİNYALLERİN TARİHÇESİNE KISA BİR GİRİŞ

Negin MELEK¹



¹ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Giresun Üniversitesi, Giresun,
Türkiye, negin.melek@giresun.edu.tr

I. GİRİŞ

İnsan vücudunun incelenmesi ilerledikçe, biyolojik sinyallerinde bazı ilerlemeler kaydedilmiştir. Daha ekonomik ve etkili klinik ve sağlık hizmetleri için, giderek artan küresel talep var. Bu nedenle, insan vücudundaki anormallikler ve hastalıkların teşhisi, izlenmesi ve tedavisinde yardımcı olmak için yeni teknikler ve ekipmanlar geliştirilmelidir. Biyomedikal sinyaller (biyolojik işaretler), uygun bir şekilde işlendiğinde bu gibi ilerlemeleri kolaylaştırma potansiyeline sahip zengin bilgi kaynaklarıdır. Bu sinyaller aslında insan sisteminde, sinir iletimi, beyin aktivitesi, kalp atışı, kas aktivitesi vb. gerçekleştirdiğinde üretilen biyoelektrik potansiyellerdir. Araştırmacılar tarafından keşif edilen biyolojik sinyallerin analizi nörolojik ve psikiyatrik teşhisinde güçlü bir araç şeklinde kullanılmıştır. Bu keşif tarihi atılım olarak sayılmaktadır. Dijital sinyal işleme konseptlerinin dahil edilmesiyle bu tür işlemlerin dijital olması çok muhtemeldir. Sinyal işleme, biyomedikal alanda teşhis amacıyla fizyolojik aktivitelerin bilgilerini çıkarmak için yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Fizyolojik süreçlerin çoğu, doğalarını ve aktivitelerini yansıtan bir sinyal üretir. Üretilen sinyal, hormonlar veya nörotransmitterler gibi biyokimyasal aktiviteyi ve voltaj veya akım sinyali olarak elektriksel aktiviteyi, basınç ve sıcaklık sinyalleri olarak fiziksel aktiviteyi içeren herhangi bir biçimde olabilir. Biyolojik süreçinde herhangi bir değişiklik olması durumunda normal biyolojik sinyalde bir değişikliğe neden olmaktadır. Bu konu biyolojik sistemde hastalık göstererek patolojik sürece yol açar. Patolojik bir süreç, sistemde farklı görünen sinyali gözlemleyerek hastalığın durumunu belirler.

Bu araştırma monografisinde, elektroensefalogram (EEG) sinyallerinin tarihçesi ve nesli hakkında kısa bir biyografi, bunların önemi ve teşhis kabiliyeti tartışması bulunmaktadır. EEG araştırması dünya çapında daha güçlü bir talep görmektedir. Günümüzde EEG araştırması, EEG'nin alınması, EEG'nin işlenmesi, EEG'nin enerji geri kazanımı vb. gibi çeşitli alanlarda ve farklı aşamalarda yürütülmektedir.

İnsan beyninin sinirsel faaliyeti, doğum öncesi dönemin 17. ve 23. haftaları arasında başlamaktadır. Bu erken evrenin yaşam boyunca beyin tarafından üretilen elektrik sinyallerinin sadece beyin fonksiyonunu değil aynı zamanda bütün vücudun durumunu da temsil ettiğine inanılıyor. Bu varsayım, insan öznesinin beyninden ölçülen EEG sinyallerine ileri dijital sinyal işleme yöntemleri uygulamak için motivasyon sağlamaktadır. EEG işaretlerin önemini dikkate alarak bu sinyallerin kısa tarihçesi aşağıda özetlenmiştir.

Bir ilk olarak Carvo Matteucci (1811-1868) ve Emil Du Bois-Reymond (1818-1896), galvanometre kullanarak kas sinirlerinden yayılan elektrik sinyallerini kayıt ederek nörofizyoloji kavramını oluşturdular [1], [2] . Ancak, Hermann Von Helmholtz tarafından getirilen aksiyon akımı kavramı, kas

kontraksiyonu sırasında ortaya çıkan olumsuz değişimleri açıklığa kavuşturarak doğrulanmıştır [3].

Bir İngiliz bilim adamı olan Richard Caton (1842-1926), beynin elektriksel özelliklerini kayıt yaparak keşfetmesiyle tanınır. Hassas bir galvanometre kullanarak hayvanların beyinlerinden elektriksel aktivite, uyku sırasında aktivitedeki dalgalanmaları ve ölümden sonra aktivite yokluğunun tespitini yapmıştır.

Fritsch (1838-1927) ve Hitzig (1838-1907), insan serebralinin elektrikle uyarıldığını keşfetmişler. Vasili Yakovlevich Danilevsky (1852-1939), Caton'un çalışmalarını izledi ve 1877'de beyin fizyolojisinin araştırılmasında doktora-sını tamamlamıştır. Bu çalışmada, beyindeki elektriksel stimülasyonunu takiben beynin aktivitesini ve hayvanların beynindeki spontan elektriksel aktiviteyi araştırarak büyük bir yol kat etmiştir.

Farklı hayvan türlerinin görsel korteks üzerinde gözlenen serebral elektriksel aktivite, Ernst Fleischl von Marxow (1845-1891) tarafından rapor edilmiştir. Napoleon Cybulski (1854-1919), bir köpekte elektriksel uyarımdan kaynaklanan bir epilepsi nöbetine ilişkin EEG bulgusuna rastlanmıştır.

Epileptik atakların anormal elektrik boşalmaları ile ilişkilendirilmesi fikri Kaufman tarafından ifade edilmiştir [4]. Bir Rus fizyolog olan Pravidch-Neminsky (1879-1952), dura adı verilen beynin EEG'sini kaydetmiştir.

İnsan EEG sinyallerinin varlığının keşfedicisi Hans Berger'dir (1873-1941). Berger 1920'de insan EEG çalışmalarına başladı [5]. Berger, neredeyse tüm elektroensefalografiler tarafından iyi bilinir. 1910'da bir telli galvanometre ile çalışmaya başladıktan sonra daha küçük bir Edelman modeline ve 1924'ten sonra daha büyük bir Edelman modeline geçiş yapmıştır. 1926'da Berger, daha güçlü Siemens çift bobinli galvanometreyi kullanmaya başlamıştır [6]. Fotografik kağıda bir ile üç dakika süreyle insan EEG kayıtları hakkındaki ilk rapora 1929'da erişilmiştir. Bu kayıta yalnızca fronto-okspital elektrotlu bir tek kanallı bipolar metot kullanılmıştır. EEG'nin kaydedilmesi 1924'te popüler hale gelmiştir.

1930'larda uyku içciklerinin ilk EEG kaydı Berger tarafından yapılmıştır. Alman Hekim (1873-1941), insan beyinde meydana gelen elektriksel potansiyelleri tanımlamak için 'elektroensefalogram' terimini icat etti [7]. Kafatasında bazı bozukluklar olan hastalardan ilk EEG okumalarını metal şeritler ve galvanometre kullanarak aldı. α ("daha yavaş ve daha büyük") ve β ("daha hızlı ve daha küçük") ritimlerini karakterize ederek zihinsel dikkat ve beyin yaralanmaları ile ilişkilendirirken EEG modellerinde meydana gelen değişikliklere odaklanmıştır. Daha sonra hypoxia'nın insan beyni üzerindeki etkisinin yanı sıra birçok yaygın ve lokalize beyin bozukluğunun doğasını bildirerek epileptik deşarjlarına bir iz vermesini sağlamıştır [8]. Bu süre zarfında

Berlin-Buch'da kurulan ve Kornmüller tarafından yönetilen başka bir grup EEG'nin daha kesin bir şekilde kaydedilmesini sağlamıştır [9]. Berger ayrıca serebral lokalizasyon ve özellikle de beyin tümörlerinin lokalizasyonu ile ilgilenmiştir. Ayrıca zihinsel aktiviteler ile EEG sinyallerindeki değişiklikler arasında bir miktar korelasyon bulmuştur.

Çok kanallı kayıtların önemi ve daha geniş bir beyin bölgesini kapsamak için çok sayıda elektrot kullanılması Kornmüller tarafından kabul edilmiştir [10]. Epileptik görünüme odaklanan ilk EEG çalışması ve epileptik spaykın ilk gösterimi Fischer ve Löwenbach tarafından sunulmuştur [11].

İngiltere'de, W. Gray Walter klinik elektroensefalografinin öncüsü olmuştur. Gray, beyin bozukluklarının teşhisinde büyük bir klinik ilgi uyandıran yavaş beyin aktivitesinin odağını keşfetmiştir (delta dalgaları).

1950'li yıllar boyunca EEG'lerle ilgili çalışmalar birçok farklı yerde genişletilmiştir. Bu süre zarfında, epileptik odakların çıkarılması için cerrahi operasyon popüler hale getirilerek epilepsi ve insan beynindeki fonksiyonel anatomi başlıklı kitap yayınlanmıştır. Bu süre zarfında mikroelektrotlar icat edilmiştir.

1960'lı yıllarda, tam ve prematüre yenidoğanların EEG'lerinin analizi başlamıştır [12]. Zihinsel hastalıkların izlenmesi için yaygın olarak kullanılan uyarılmış potansiyellerin (EP'ler), özellikle görsel EP'lerin araştırılması, 1970'li yıllarda ilerletilmiştir.

EEG'nin geçmişi, 1300'lü yılların başından beri kesintisiz bir şekilde devam etmektedir. EEG araştırmaları, günümüzde sayısız nörolojik ve fizyolojik beyin ve merkezi sinir sisteminin (CNS) anormalliğinin keşfedilmesi, tanımlanması, teşhisi ve tedavisi için klinik, deneysel ve hesaplamalı çalışmaların gelişimini sağlamaktadır. Günümüzde EEG'ler tamamen bilgisayarlı sistemler kullanılarak invaziv ve noninvaziv olarak kaydedilmektedir. EEG makineleri birçok sinyal işleme aleti, hassas ve doğru ölçüm elektrotları ve birkaç saatlik çok uzun süreli kayıtlar için yeterli bellek ile donatılmıştır.

Biyomedikal sinyallerin çoğu, olayla ilgili potansiyel ve aksiyon potansiyeli gibi iki kategoriye ayrılır [13]. Bir aksiyon potansiyeli sinyali, tek bir hücrede fizyolojik aktiviteler tarafından üretilen bir elektrik sinyalidir. Olayla ilgili potansiyeller daha geneldir ve uyarılmış potansiyel olarak adlandırılır.

II. Sinirsel Aktiviteler, Aksiyon Potansiyelleri

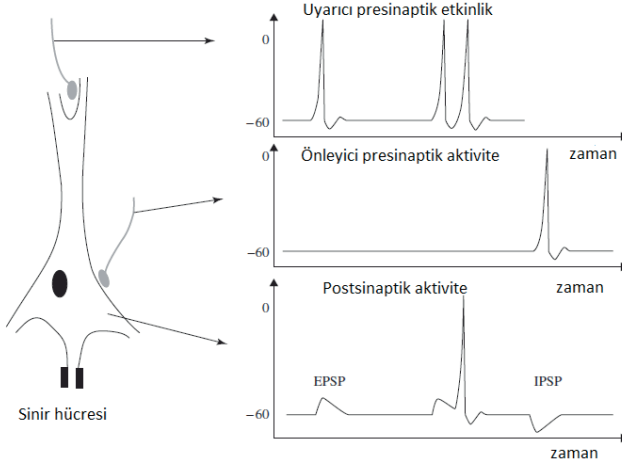
Sinir sisteminde iki ana hücre sınıfı vardır: sinir hücreleri (nöronlar) ve glial hücreler. İnsan beynindeki nöron sayısının 10^{11} civarında olduğu tahmin edilmektedir, ancak glial hücrelerin sayısı nöronlardan 10 ila 50 kat fazladır. Nöronlar sinapslar aracılığıyla diğer nöronlarla iletişim halindedir. Tipik bir nöron 1000-2000 sinapsa sahiptir ve diğer nöronlardan kaynaklanan ben-

zer sayıda sinaps, plazma zarına bağlıdır, ancak bu sayılar nörondan nörona büyük ölçüde değişir. Merkezi sinir sistemi nöronlar arasında bulunan sinir hücreleri ve glia hücrelerinden oluşur. Her sinir hücresi aksonlardan, dendritlerden ve hücre gövdelerinden oluşur. Tüm bu bölgelerin bilgi transferinde (yani, aksiyon potansiyellerinin üretilmesi ve bu sinyallerin hücreden hücreye iletilmesi) rolleri vardır. Sinir hücreleri uyarılara tepki verir ve uzun mesafelerde bilgi aktarır. Bir sinir hücresi tek bir çekirdeğe sahiptir ve sinir hücresi metabolizmasının çoğunu, özellikle protein senteziyle ilgili olanları içerir. Hücre gövdesinde oluşturulan proteinler sinirin diğer kısımlarına iletilir. Bir akson, bir elektriksel itki ileten ve omurgalılarda birkaç metre uzunluğa sahip uzun bir silindirdir. İnsanlarda uzunluğunun bir milimetreden bir metrelik bir yüzdesi olabilir. Hücrenin uçlarına protein aktarmak için bir aksonal taşıma sistemi mevcuttur ve taşıma sistemi, tübülün rayları üzerine binen 'moleküler motorlara' sahiptir.

Dendritler, diğer hücrelerin aksonlarına veya dendritlerine bağlanır ve diğer sinirlerden dürtü alır veya sinyalleri diğer sinirlere iletir. İnsan beyinde her sinir çoğunlukla dendritik bağlantılar vasıtasıyla yaklaşık 10.000 sinir ile bağlantılıdır.

Merkezi nüranal sistemdeki faaliyetler esas olarak aksonlar ve dendritlerin kavşakları (sinapslar) arasında aktarılan sinaptik akımlar veya hücrelerin dendritleri ile ilgilidir. Negatif polariteye sahip 60-70 mV'luk bir potansiyel, hücre gövdesinin zarı altında kaydedilebilir. Bu potansiyel, sinaptik faaliyetlerdeki değişikliklerle değişir. Uyarıcı bir sinapsla biten fiber boyunca bir aksiyon potansiyeli dolaşırsa, aşağıdaki nöronda bir uyarıcı postsinaptik potansiyel (EPSP) oluşur. Eğer iki aksiyon potansiyeli aynı fiber boyunca kısa bir mesafede ilerlerse, belirli bir zar potansiyel eşiği sağlayan postsinaptik nöron üzerinde bir aksiyon potansiyeli üreten EPSP'lerin bir toplamı elde edilecektir. Eğer fiber bir kısıtlayıcı sinapsla biterse, hiperpolarizasyon meydana gelir ve bu da kısıtlayıcı postsinaptik potansiyeli (IPSP) ile gösterilir [14]. Şekil 1.1, yukarıdaki aktiviteleri şematik olarak göstermektedir.

Bir IPSP üretildikten sonra, sinir hücresinden bir miktar katyon veya anyonların sinir hücresine girişi vardır. Bu akış nihayetinde sinir hücresi zarındaki potansiyel değişikliğine neden olur. Primer transmembran akımlar hücre içi ve dışı alanlarda, hücre zarı boyunca ikincil inonal akımlar üretir. Bu akımların hücre dışı boşluğundan akan kısmı, alan potansiyellerinin üretilmesinden doğrudan sorumludur. 100 Hz'den daha düşük frekanslı bu alan potansiyelleri, sinyal ortalamasında herhangi bir değişiklik olmadığında EEG olarak adlandırılır ve ortalama sinyallerde yavaş sapmalar varsa gerçek EEG sinyallerinin maskelenmesine neden olabilir. EEG ve DC potansiyellerinin bir kombinasyonu, beyindeki nöbet [15], hiperkapni ve asfiksi gibi bazı anormallikler için sıklıkla gözlenir [16]. Odak noktası, daha sonra aktif potansiyellerin doğası üzerine olacaktır.



Şekil 1.1 Sinaptik aktivasyon sırasında nöron zar potansiyel değişiklikleri ve akım akışı, hücre içi mikroelektrotlar ile kaydedilmiştir. Uyarıcı ve kısıtlayıcı ön sinaptik fiberdeki eylem potansiyelleri sırasıyla postsinaptik nöronda EPSP ve IPSP'ye yol açmaktadır [17].

Bir sinir tarafından iletilen bilgilere aksiyon potansiyeli (AP) denir. Aksiyon potansiyelleri “ya hep ya hiç” yasasına uyar - bir uyarıcı uyarıcı eşikini aşacak kadar güçlü olduğunda, tam teşekküllü bir aksiyon potansiyeli ortaya çıkar. Uyarıcının büyüklüğü eşik altındaysa, yalnızca nöronal plazma zarı boyunca yayılmayan zar potansiyelinde lokal bir düşüşle sonuçlanır. Aksiyon potansiyeli doğası gereği kendiliğinden yayılır. Önündeki zar bölgelerini elektrotonik olarak depolarize eder, kaynak bölgesinden her yöne dairesel olarak yayılır ve ayrıca aksonu hem yukarı hem de aşağı yönlerde kat eder. AP'ler, nöron zarı boyunca iyon alışverişinden kaynaklanır ve AP, akson boyunca iletilen membran potansiyelinde geçici bir değişikliktir. Genellikle hücre gövdesinde başlatılır ve normalde tek yönde ilerler. Membran potansiyelini depolarize eder (daha pozitif olur), bir başak oluşturur. Başak zirvesinden sonra membran repolarize olur (daha negatif hale gelir). Potansiyel, dinlenme potansiyelinden daha negatif hale gelerek daha sonra normale döner. Çoğu sinirin aksiyon potansiyeli 5 ila 10 milisaniye arasında sürer. Aksiyon potansiyellerinin iletim hızı 1 ila 100 m / s arasındadır. AP'ler birçok farklı uyarıcı türü tarafından başlatılır; Duyusal sinirler kimyasal, ışık, elektrik, basınç, dokunma ve gerilme gibi birçok uyarıcıya tepki verirler. Öte yandan merkezi sinir sistemi içindeki sinirler (beyin ve omurilik) çoğunlukla sinapslarda kimyasal aktivite ile uyarılır.

Bir AP başlatmak için uyarıcı bir eşik seviyesinin üzerinde olmalıdır. Çok zayıf uyarıcılar, küçük bir lokal elektriksel rahatsızlığa neden olur, ancak iletilen AP üretmezler. Uyarıcı gücü eşik değerinin üzerine çıkınca bir aksiyon potansiyeli belirir ve sinirin aşağısına geçer.

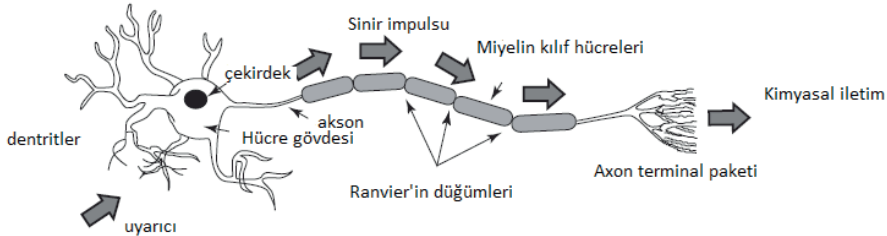
AP'nin başlangıcı esas olarak Na (sodyum) kanallarının açılmasıyla meydana gelir. Na pompası hem Na hem de K (potasyum) iyonlarının gradyanlarını üretir. Her ikisi de aksiyon potansiyeli üretmek için kullanılır; Na, hücrenin dışında yüksek ve içeride düşüktür. Uyarılabilen hücreler, membran voltajına yanıt olarak açılıp kapanan özel Na ve K kanallarına sahiptir. Na kanallarının kapısını açma sonucunda, Na'nın pozitif yük taşıyan hücreye girmesi sağlanacaktır. Bu, zarın potansiyelini pozitif (depolarizasyon) yapar ve sivri uç üretir. Bir insan için AP genliği yaklaşık -60 mV ile 10 mV arasında değişir.

Sonuç olarak, EEG, yalnızca sinaptik iletiler nedeniyle meydana gelen potansiyel değişiklikleri kaydedebilir. Aksiyon potansiyeli akson terminaline ulaştığında, sinaps bölgesinde nörotransmitterler salınır ve postsinaptik hücrelerde sergileyici postsinaptik dereceli potansiyellerin (EPSP'ler) veya inhibe edici postsinaptik dereceli potansiyellerin (IPSP'ler) ortaya çıkmasına neden olur. Bu potansiyeller, hücre zarının hücre dışı boşluğunda iyonik akımların akışına yol açar ve böylece çok küçük büyüklüklerde yerel alan potansiyelleri üretir.

III. EEG Üretimi, Beyin Ritimleri, EEG Kaydı ve Ölçümü

EEG sinyali, serebral kortekste birçok piramidal nöronun dendritlerinin sinaptik uyarımları sırasında akan akımların ölçümüdür. Beyin hücreleri aktive olduğunda, sinaptik akımlar dendritler içinde üretilir. Bu akım, elektromyogram (EMG) makineleri ile ölçülebilen bir manyetik alan ve EEG sistemleri tarafından ölçülebilen kafa derisi üzerinde ikincil bir elektrik alanı üretir.

Elektrik potansiyellerinin farklılıkları, piramidal hücrelerden, soma (bir nöronun gövdesi) ve nörondan çıkan apikal dendritler arasında elektrik dipol-leri oluşturan toplam postsinaptik dereceli potansiyellerden kaynaklanır (Şekil 1.2). Beyindeki akım çoğunlukla pozitif iyonlardaki sodyum, Na^{+} , potasyum, K^{+} , kalsiyum, Ca^{++} ve klorun negatif iyonu olan Cl^{-} 'yi membran potansiyeli ile yönetilen yönde nöron zarlar yoluyla pompalayarak üretilir [18], [19].



Şekil 1.2 Bir nöronun yapısı (Attwood ve MacKay tarafından benimsenmiştir).

İnsan kafası, kafa derisi, kafatası, beyin gibi farklı tabakalardan oluşur, ve diğer birçok ince tabaka arasındadır. Kafatası, sinyalleri yumuşak dokudan yüz kat daha zayıflatır. Öte yandan, gürültünün çoğu beyinde veya kafa derisi

üzerinde oluşur. Bu nedenle, aktif nöronların yalnızca büyük popülasyonları, kafa derisi elektrotlarını kullanarak kayıt yapılabilmesi için yeterli potansiyel oluşturabilir. Bu sinyaller daha sonra görüntüleme amacıyla büyük oranda büyütülür.

Doğumda merkezi sinir sistemi (CNS) tam ve fonksiyonel hale geldiğinde yaklaşık 10^{11} nöron geliştirilir. Bu, kübik mm başına ortalama 10^4 nöron yapar [20]. Sinirler sinapslar yoluyla sinir ağlarına bağlanır. Yetişkinlerin yaklaşık 5×10^{14} sinapsları vardır. Nöron başına sinaps sayısı yaşla birlikte artarken, nöron sayısı yaşla birlikte azalmaktadır. Anatomik açıdan beyin üç kısma ayrılabilir: beyincik, serebellum ve beyin sapı. Serebral, serebral korteks adı verilen oldukça kıvrımlı yüzey katmanları ile beyindeki sol ve sağ loblardan oluşur. Beyincik, kasların gönüllü hareketlerini koordine eder ve dengeyi korur. Beyin sapı, solunum, kalp regülasyonu, biyolojik ritimler ve nörohormon ve hormon bölümleri gibi istem dışı işlevleri kontrol etmektedir [21].

Aslında beyindeki büyük nöron popülasyonlarından üretilen elektriksel aktivite, kafa derisine monte edilmiş EEG sensörleri kullanılarak ölçülür. Sonuç olarak, çeşitli bilişsel ve duygusal durumlarda beyin aktivitesi hakkında bilgi edinebiliriz. Yukarıdaki bölümden yola çıkarak, EEG çalışmalarının, insan vücudundaki birçok nörolojik bozukluk ve diğer anormallikleri teşhis etmenin yolunu açtığı açıktır. Elde edilen EEG sinyalleri, bir insandan (ve ayrıca hayvanlardan) aşağıdaki klinik problemlerin araştırılması için kullanılabilir [17]:

- (a) insan-bilgisayar arayüz uygulamalarında;
- (b) uyanıklık, koma ve beyin ölümü izleme;
- (c) baş yaralanması, felç ve tümör sonrası hasar alanlarının bulunması;
- (d) anestezi derinliğini kontrol etme;
- (e) epilepsiyi araştırmak ve nöbet kaynağını bulmak;
- (f) epilepsi ilaç etkilerini test etme;
- (g) beyin gelişimini izlemek;
- (h) uyku bozuklukları ve fizyolojisini araştırmak;
- (i) zihinsel bozuklukları araştırmak;
- (j) diğer görüntüleme yöntemleri ile birlikte bir hibrid veri kayıt sistemi sağlama.

Pek çok beyin bozukluğu [22], EEG sinyallerinin görsel testi ile teşhis edilir. Alandaki klinik uzmanlar, EEG sinyallerindeki beyin ritimlerinin konusunda bilgi sahibidirler. Sağlıklı yetişkinlerde, bu sinyallerdeki genlikler ve frekanslar bir insanın farklı hallerinde mesela uyanıklık ve uyku gibi durumlarda değişir. Dalgaların özellikleri de yaşla değişmektedir.

Beynin farklı fonksiyonel durumlarına bağlı olarak beyin dalgalarında farklı ritim türleri gözlemlenebilir. Farklı frekans aralıklarıyla ayırt edilen beş büyük beyin dalgası mevcuttur. Düşük frekanslardan yüksek frekanslara sırasıyla delta (δ), teta (θ), alfa (α), beta (β), ve gama (γ) aralıkları tanımlanabilmektedir [23]. Bu dalgaların frekans modellerindeki herhangi bir ince değişiklik, nörolojik bozuklukların teşhisinde veya bazı dış uyaranlara yanıt olarak nöronal aktivitenin meydana geldiği sonucuna varmada yardımcı olmaktadır.

Alfa ve beta dalgaları 1929'da Berger tarafından tanıtıldı. Jasper ve Andrews (1938) "gama" terimini, 30 Hz'in üzerindeki dalgaları belirtmek için kullandılar. Delta ritmi, Walter (1936) tarafından tüm frekansları alfa aralığının altına düşürmek üzere başlatılmıştır. Ayrıca teta dalgalarını, 4-7.5 Hz aralığında frekanslara sahip olanlar olarak tanıttı. Bir teta dalgası kavramı 1944'de Wolter ve Dovey tarafından ortaya atılmıştır [24].

Delta dalgaları 0.5-4 Hz aralığında bulunur. Bu dalgalar öncelikle derin uyku ile ilişkilidir ve uyanık halde olabilir. Boyun ve çenenin büyük kaslarının neden olduğu artefakt sinyallerini orijinal delta tepkisi ile karıştırmak çok kolaydır. Bunun nedeni, kasların cildin yüzeyine yakın olması ve büyük sinyaller üretmesidir. Bu ritmi kullanarak EEG sinyal analizlerinde farklı çalışmalar yapılabilmektedir. Örneğin 2022 yılında [25], Delta ritmini ve LightGBM algoritmasını kullanarak EEG işaretlerinin sınıflandırma performansının iyileşmesi sağlanmıştır. Farklı bir çalışmada [26], delta ritmini kullanarak gerçek zamanlı tahmin sistemi geliştirilmiştir.

Teta dalgaları 4-7.5 Hz aralığında bulunur. Teta dalgaları bilinçin uykusuzluğa doğru kayarken görülür. Bu dalgalar, bilinçsiz materyal, yaratıcı ilham ve derin meditasyona erişimle ilişkilendirilmiştir. Bir teta dalgasına genellikle diğer frekanslar eşlik eder ve uyarılma seviyesiyle ilişkili gibi görünür. Teta dalgası bebeklik ve çocukluk çağında önemli bir rol oynamaktadır. Uyanık erişkinde teta dalga aktivitesinin daha büyük koşulları anormaldir ve çeşitli patolojik problemlerden kaynaklanmaktadır. Teta dalgalarının ritmindeki değişiklikler olgunlaşma ve duygusal çalışmalar için incelenmektedir [27].

Alfa dalgaları başın arka yarısında görülür ve genellikle beynin oksipital bölgesinde bulunur [28]. Alfa ritmi kişi uyanıkken ve gözleri kapalıyken gevşemiş durumdayken en yüksek genliğe sahiptir ve gözleri açarak ve zihinsel çabanın yanı sıra uyuşukluk veya uyku ile zayıflatılır. Beynin posterior loblarının her yerinde tespit edilebilirler. Alfa dalgaları için frekans 8-13 Hz aralığında bulunur ve genellikle bir yuvarlak veya sinüzoidal şekilli sinyal olarak görülebilirler. Alfa dalgalarının dikkat veya konsantrasyon olmaksızın rahat bir farkındalığa işaret ettiği düşünülmektedir. Alfa dalgası, beyin faaliyetinin tüm alanındaki en belirgin ritimdir. Bir alfa dalgası oksipital bölgelere göre daha yüksek bir genliğe sahiptir ve normalde 50 μV 'den daha düşük bir genliğe vardır.

Bir beta dalgası, beyindeki 14-26 Hz aralığında değişen elektriksel aktivitelerdir. Bu dalga, aktif düşünce, aktif dikkat, dış dünyaya odaklanma veya somut problemleri çözme ile ilgili beynin uyanış ritimidir ve normal yetişkinlerde bulunur [29]. Bir insan panik halinde olduğunda üst düzey bir beta dalga elde edilebilir. Ritmik beta aktivitesi başta frontal ve merkez bölgeler üzerinde görülür. Önemlisi, merkezi bir beta ritmi, rolandik mu ritmiyle ilişkilidir ve motor aktivite veya dokunsal uyarıyla engellenebilir. Beta ritminin genliği normalde 30 μV 'nin altındadır. Mu ritmine benzer şekilde, beta dalgası ayrıca bir kemik defekti ve tümöral bölgelerin etrafında gelişebilir.

30 Hz'in üzerindeki frekanslar (esas olarak 45 Hz'e kadar), gamma aralığına karşılık gelir (bazen hızlı beta dalgası olarak adlandırılır). Bu ritmlerin genlikleri çok düşük olmakla birlikte, oluşumu nadir olsa da, saptanması bazı beyin hastalıklarının teyitinde kullanılabilir. Gamma dalga bandının aynı zamanda beyindeki olaya bağlı senkronizasyonu (ERS) için iyi bir göstergesi olduğu kanıtlanmıştır, ve sağ, sol parmak hareketleri, sağ ayak parmakları ve oldukça geniş ve iki taraflı alan dil hareketi için kullanılabilir [30].

İnsan vücudundan sinyaller ve görüntülerin kaydı ve analizi, çeşitli hastalıkların erken teşhisi için yaşamsal önem arz etmektedir. Bu tür veriler, aşağıdaki gibi elektrobiyolojik sinyaller şeklinde olabilir: kalpten alınan bir elektrokardiyografi (EKG), kaslardan elektromiyogram (EMG), beyinden gelen elektroensefalografi (EEG), beyindeki manyetoensefalogram (MEG), ve gözden elektroklorgram (EOG) sinyaller. Ölçümler aynı zamanda bir tür ultrason veya radyografi örneğinin ultrason görüntüsü, bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MRI) veya fonksiyonel MR (fMRI) şeklini de alabilir. Beyindeki fonksiyonel ve fizyolojik değişiklikler EEG, MEG veya fMRI ile kaydedilebilir. Bununla birlikte, fMRI uygulaması bir takım önemli nedenden dolayı EEG'ye veya MEG ile kıyasla çok sınırlıdır:

I.EEG veya MEG sinyallerini kullanarak tam EEG bant genişliği görüntülenebilirken, fMRI görüntü dizilerinin zaman çözünürlüğü çok düşüktür.

II.Birçok zihinsel aktivite, beyin bozukluğu ve beyindeki arıza, fMRI kullanılarak kaydedilemez, çünkü oksijenlenmiş kan seviyesindeki etkisi düşüktür.

III.fMRI'ye (ve MEG'e) erişilebilirlik sınırlı ve masraflıdır.

IV.Bununla birlikte, EEG'nin mekansal çözünürlüğü, kayıt elektrotlarının sayısı (veya MEG için bobinlerin sayısı) ile sınırlıdır.

EEG sistemleri, çeşitli hassas elektrotlardan, bir dizi diferansiyel amplifikatörden (her kanal için bir tane), ardından filtrelerden [21] ve iğne (kalem) tipi kayıtlardan oluşmaktadır. Bu sistemler piyasaya girdikten kısa süre sonra, araştırmacılar sinyalleri sayısallaştırıp depolayabilecek bilgisayarlı bir sistem aramaya başladılar. Bu nedenle, EEG sinyallerinin analiz edilmesi için kısa

sürede sinyallerin dijital biçimde olması gerektiği anlaşılmıştır. Bu konu, sinyallerin örnekleme, kuantumlanması ve kodlanması gerektirir. Elektrot sayısı arttıkça, bit sayısı açısından veri hacmi de artmaktadır. Analogdan dijital EEG'ye dönüşüm, çok kanallı analog-dijital dönüştürücüler (ADC'ler) aracılığıyla gerçekleştirilir. Neyse ki, EEG sinyallerinin efektif bant genişliği yaklaşık 100 Hz ile sınırlıdır. Birçok uygulama için bu bant genişliği bu değer yarısı kadar kabul edilebilir. Dolayısıyla, EEG sinyallerinin örnekleme için genellikle 200 örnek / s'lik bir minimum frekans (Nyquist kriterini sağlamak için) yeterlidir.

Teşhis bilgilerinin muhafaza edilmesi için EEG sinyallerinin kuantizasyonu normalde çok iyidir. Her bir sinyal örneğinin 16 bit'e kadar temsil edilmesi, EEG kayıt sistemleri için oldukça popülerdir. Böylece bu konu, özellikle uyku EEG ve epileptik nöbet izleme kayıtları için sinyalleri arşivlemek amacıyla gerekli bellek hacmini sağlamaktadır. Çok sayıda elektrotlu ve çok kanallı kayıtlar için, elektrot kapakları (caps) sıklıkla kullanılır. Yaygın olarak kullanılan saç derisi elektrotları, bir amplifikatöre takılabilen uzun esnek kablolarla birlikte 3 mm'den daha küçük Ag-AgCl disklerinden oluşmaktadır. İğne elektrotları, minimal invaziv işlemlerle kafatasının altına implante edilmesi gereken elektrotlardır. Korteks ile elektrotlar arasındaki yüksek empedans bozulmaya neden olarak gerçek EEG sinyallerini maskeleyebilmektedir. Ticari EEG kayıt sistemleri genellikle empedans monitörleri ile donatılmıştır. Tatmin edici bir kayıt sağlamak için elektrot impedansları $5k\Omega$ 'in altında okunmalı ve birbirlerinin $1k\Omega$ 'inde dengelenmelidir. Daha doğru ölçüm için, her denemeden sonra empedanslar kontrol edilir [31].

EEG kayıt elektrotları [32] ve bunların doğru işlevi, yüksek kaliteli veriler elde etmek açısından çok önemlidir. EEG kayıt sistemlerinde aşağıdaki gibi farklı elektrot tipleri kullanılır:

- tek kullanımlık (jelsiz ve önceden jelleştirilmiş);
- tekrar kullanılabilir disk elektrotları (altın, gümüş, paslanmaz çelik veya kalay);
- baş bantları ve elektrot kapakları;
- tuzlu elektrotlar;
- iğne elektrotları.

Yeni nesil kuru, düz tip elektrotların ve kendinden yapışkanlı önceden jelleştirilmiş elektrotların performansının değerlendirilmesi [33]'de sunulmuştur.

EEG sinyalleri doğrusal ve doğası gereği durağan değildir [38]. EEG ölçümlerinin voltaj dalgalanmalarındaki küçük değişimler, bazı nöronal aktivitelerin meydana geldiği sonucuna varır. Dolayısıyla bu sinyallerin görsel olarak incelenmesi, uzmanlık deneyimine göre değişir. Ayrıca, uzun EEG kayıtlarının manuel olarak incelenmesi çok fazla zaman gerektirir ve bazen sinyallerdeki artefaktların varlığı nedeniyle sonuçlar hatalı olabilir. Dolayısıyla bu sinyallerin işlenmesi ve analizi bilgisayar destekli teknolojiler yardımıyla hızlı ve doğru sonuçlar alınabilmesi için yapılabilmektedir. Ham EEG sinyallerinin μ Volt'luk genlikleri vardır ve 300 Hz'ye kadar frekans bileşenleri içerir. Etkili bilgileri kaybetmemek için, sinyaller analogdan dijitale dönüştürücü'den (ADC) önce yükseltilmelidir. Gürültüyü azaltmak, sinyallerin uygun bir şekilde işlenmesi ve görselleştirmesi için işaretler ADC'den önce veya sonra, filtrelenmelidirler [39].

Filtreler, sinyallere herhangi bir değişiklik veya bozulma getirmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Kesim frekansı genellikle 0.5 Hz'den daha düşük olan yüksek geçiş filtreleri, nefes alma gibi rahatsız edici çok düşük frekans bileşenlerini kaldırmak için kullanılır. Öte yandan, yüksek frekanslı gürültü, yaklaşık 50-70 Hz'lik bir kesme frekansı ile alçakgeçiren filtreler kullanılarak hafifletilir. 50Hz'lik sıfır frekanslı çentik filtreleri çoğu zaman güçlü 50Hz güç kaynağının mükemmel bir şekilde söndürmesini sağlamak için gereklidir [40]. Bu durumda örnekleme frekansı, çoğu EEG sistemi tarafından yaygın olarak kullanılan bant genişliğinin iki katı kadar düşük olabilir. EEG kayıtları için sık kullanılan örnekleme frekansları 100, 250, 500, 1000 ve 2000 örnek / s'dir.

Esas artefaktlar hasta ile ilgili (fizyolojik) ve sistem artefaktlarına bölünebilir. Hastayla ilgili veya dahili artefaktlar vücut hareketiyle örneğin EEG, EKG (ve titreşim), EOG, ve terleme ile ilgilidir. Sistem artefaktları, 50/60 Hz güç kaynağı etkileşimi, empedans dalgalanması, kablo hataları, elektronik bileşenlerden gelen elektriksel ses ve elektrotların dengesiz empedanslarıdır. Genellikle ön işleme aşamasında bu artefaktlar oldukça hafifletilir ve bilgilendirici bilgiler geri yüklenir. EEG artefaktı kaldırmak için bazı yöntemler [17] 'de anlatılmıştır.

Bazı farklı durumlarda bireylerin EEG modellerinde değişiklikler anormallik gösterir [41]. Bu bozulma örüntü kaybolması, anormal örüntü görünüşü, veya tüm örüntülerin kaybolması şeklinde olabilir.

Yaşlanma süreci uyanma ve uykudaki normal serebral aktiviteyi etkilemektedir ve beynin uyarıya cevabını değiştirir. Değişiklikler, nöron sayısının azaltılması ve beyin patolojisinde genel bir değişiklik nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu patoloji beyindeki frontal ve temporal lobların parietal loblardan daha fazla etkilendiğini ve bunun da büyük nöronların küçültüleceğini ve küçük nöronların ve gliaların sayısını arttırdığını göstermektedir. Kortikal

hacimde azalma, yaşla ilgili nöronal kayıp olduğunu göstermektedir. Beynin yaşlanması için genel bir neden serebral kan akışındaki azalmadır [17]. Alfa frekansında bir azalma [42] muhtemelen EEG’de en sık karşılaşılan anormalliktir. Bu, çoğunlukla yaşlılarda frontal bölgede daha büyük bir etki yaratarak alfa dalga engelleme yanıtını ve tepkisini azaltır. Genellikle klinik nöbetin başlangıcı EEG ölçümünde ani bir frekans değişikliği ile karakterizedir [43], [44]. Normalde alfa frekansı bandında, nöbet süresince frekansta yavaş yavaş bir azalma (ancak amplitüdde artış) bulunur. Nöbetin ortak artefaktlerden ayrımı zor değildir. Bir EEG ölçümündeki nöbet artefaktleri belirgin dikenli ancak tekrarlayan (ritmik) doğaya sahipken, diğer artefaktler çoğunluğu geçici veya ses benzeri şekildedir.

Fonksiyonel anatomik beyin anormallikleri araştırmalarının yanı sıra, patofizyolojik beyin bozuklukları da EEG sinyallerini analiz ederek incelenebilir. Normal ve öğrenim engelli çocuklar arasındaki farklı olgunlaşma modellerini düşündüren EEG tutarlılık önlemlerinden elde edilen bulgular kanıtlanmıştır [45]. Bu bulgu, öğrenme bozukluklarının izlenmesinde bazı metodolojilerin oluşturulmasına yol açabilmektedir. Birden fazla psikiyatrik bozukluk, aynı uyarılara sahip birkaç ardışık yolun ortalaması alınarak elde edilen uyarılmış potansiyellerin (EP) analizi ile teşhis edilmiştir. Dikkat eksikliği hiperaktivite bozukluğu (ADHD) ve dikkat eksikliği bozukluğu (ADD), davranış bozukluğu, ve yıkıcı davranış bozukluğu da araştırılmaktadır. Bu anormalliklerin çoğu çocukluk döneminde görülür ve çoğu zaman çocukların öğrenmesini ve iyi sosyalleşmesini önler.

EEG sinyal işleme ve analizi temel olarak dört adımda gerçekleştirilir: filtreleme veya diğer bazı tekniklerin yardımıyla ham sinyallerin ön işlenmesi, ardından en önemli bilgilerin öznitelik biçiminde çıkarılması, daha fazla optimize edilmiş özellik seçim yöntemlerinin uygulanması. Son olarak sonuç analizi aşamasında, makine öğrenme modelleri veya istatistiksel testler aracılığıyla hastalık teşhisi veya beynin farklı işlevsel durumlarının tanınması yapılır [35].

V. Sonuç

EEG işaretlerinde yapılan bulgular, beyin sinyallerinin düzensiz ve tutarsız olmadığını, bunun yerine elektriksel değişikliklerinin bazı aktivitelerin meydana geldiğini anlamaya yardımcı olan bazı periyodik kalıpları ortaya çıkardığını göstermektedir. Bu buluş EEG sinyallerine dayalı uygulamaların çoğu için bir kapı açmıştır. Olağanüstü zamansal duyarlılığı göz önüne alındığında, EEG’nin ana faydası, dinamik serebral işleyişin değerlendirilmesidir. Yüksek zamansal çözünürlüklü bir araç olarak EEG, fMRI ve MEG gibi diğer araçlarla karşılaştırıldığında doğrusal olmayan teknikler kullanılarak beynin işlevsel ve yapısal analizi için daha uygundur.

Bu çalışmada, aksiyon potansiyelleri ve dolayısıyla EEG sinyallerinin üretilmesindeki temel kavramlar kısaca açıklanmıştır. Ayrıca normal veya anormal EEG’lerde bulunan EEG kaydı ve beyin ritimleri için geleneksel ölçüm ayarları detaylı sunulmuştur. Buna ek olarak, zihinsel hastalıklar, yaşlanma ve epileptik ve nonepileptik saldırılar gibi popüler beyin anormalliklerinin etkileri belirtilmiştir. Bu hastalıkların EEG’lerindeki benzerlikler ve farklılıklar iyi anlaşılmalıdır. Öte yandan, geliştirilen matematiksel algoritmalar bu tür işlemlerin sonuçlarını daha da geliştirmek için, klinik gözlemleri ve bulgularını hesaba katmalıdırlar. Yukarıdaki anormalliklerle ilişkili olarak EEG’lerin işlenmesi için bir takım teknik yöntemler iyi oluşturulmuş olmasına rağmen hala uzun bir yol var ve birçok soru cevaplanmalıdır.

EEG sinyallerinin analizi için kullanılan yeni dijital sinyal işleme tekniklerini ve bu gibi yöntemlerin uygulanmasında bir takım örnekler birçok kaynakta detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur [17], [46], [36].

Son zamanlarda yapılan araştırmalar sınırı ve ana eğilim, beyin işlevi ve hastalığının moleküler, hücresel ve küresel düzeylerde kapsamlı bir şekilde incelenmesi ve beyin gelişimi sürecinden beyin yapısı ilkesinin anlaşılmasıdır. Bu incelemelerde, çalışmak için üç yön seçilmektedir: EEG’nin işlenmesi, EEG’nin alınması ve EEG uygulaması. Bu bağlamda, akademisyenler esas olarak davranışsal ve elektrofizyoloji, sinir ağı, çok uçlu elektroensefalogramlar ve invaziv olmayan beyin görüntüleme teknolojisine odaklanarak ve çalışmalar yürüterek tıp dünyasına erken teşhis açısından daha parlak ışık tutmayı hedeflemektedirler.

KAYNAKÇA

- [1] R. Caton, "The Electric Currents of the Brain," <http://dx.doi.org/10.1080/00029238.1970.11080764>, vol. 10, no. 1, pp. 12–14, Mar. 2015, doi: 10.1080/00029238.1970.11080764.
- [2] W. G. Walter, "Slow potential waves in the human brain associated with expectancy, attention and decision," *Arch. für Psychiatr. und Nervenkrankheiten Ver. mit Zeitschrift für die Gesamte Neurol. und Psychiatr.*, vol. 206, no. 3, pp. 309–322, May 1964, doi: 10.1007/BF00341700/METRICS.
- [3] M. Cobb, "Exorcizing the animal spirits: Jan Swammerdam on nerve function," *Nat. Rev. Neurosci.* 2002 35, vol. 3, no. 5, pp. 395–400, 2002, doi: 10.1038/nrn806.
- [4] "A history of the electrical activity of the brain: The first half-century." <https://psycnet.apa.org/record/1962-05971-000> (accessed Apr. 07, 2023).
- [5] M. Avoli, "Pierre Gloor (1923-2003): an appreciation," *Epilepsia*, vol. 45, no. 7, pp. 882–886, 2004, doi: 10.1111/J.0013-9580.2004.12603.X.
- [6] A. M. Grass and F. A. Gibbs, "A FOURIER TRANSFORM OF THE ELECTROENCEPHALOGRAM," <https://doi.org/10.1152/jn.1938.1.6.521>, vol. 1, no. 6, pp. 521–526, Nov. 1938, doi: 10.1152/JN.1938.1.6.521.
- [7] A. Khosla, P. Khandnor, and T. Chand, "A comparative analysis of signal processing and classification methods for different applications based on EEG signals," *Biocybern. Biomed. Eng.*, vol. 40, no. 2, pp. 649–690, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.BBE.2020.02.002.
- [8] L. F. Haas, "Hans Berger (1873-1941), Richard Caton (1842-1926), and electroencephalography," *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 74, no. 1, p. 9, 2003, doi: 10.1136/JNNP.74.1.9.
- [9] J. H. Spear, "Cumulative Change in Scientific Production: Research Technologies and the Structuring of New Knowledge," *Perspect. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 55–85, Mar. 2004, doi: 10.1162/106361404773843346.
- [10] H. W. Shipton, "EEG Analysis: A History and a Prospectus," <https://doi.org/10.1146/annurev.bb.04.060175.000245>, vol. 4, pp. 1–13, Nov. 2003, doi: 10.1146/ANNUREV.BB.04.060175.000245.
- [11] M. H. Fischer and H. Löwenbach, "Aktionsströme des Zentralnervensystems unter der Einwirkung von Krampfgiften - I. Mitteilung: Strychnin und Pikrotoxin," *Naunyn. Schmiedebergs. Arch. Exp. Pathol. Pharmacol.*, vol. 174, no. 3–4, pp. 357–382, May 1933, doi: 10.1007/BF01864468/METRICS.
- [12] E. Aserinsky and N. Kleitman, "Regularly occurring periods of eye motility, and concomitant phenomena, during sleep," *Science*, vol. 118, no. 3062, pp. 273–274, 1953, doi: 10.1126/SCIENCE.118.3062.273.
- [13] R. M. Rangayyan, I. X. (Online service), and J. W. & Sons, *Biomedical sig-*

- nal analysis : a case-study approach*. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2015. doi: 10.1109/9780470544204.
- [14] E.-J. Speckmann, “Introduction of the neurophysiological basis of the EEG and DC potentials,” 1993.
- [15] A. Cianfoni *et al.*, “Seizure-induced brain lesions: A wide spectrum of variably reversible MRI abnormalities,” *Eur. J. Radiol.*, vol. 82, no. 11, pp. 1964–1972, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.ejrad.2013.05.020.
- [16] H. Caspers, E. J. Speckmann, and A. Lehmenkühler, “DC potentials of the cerebral cortex. Seizure activity and changes in gas pressures.,” *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.*, vol. 106, pp. 127–178, 1987, doi: 10.1007/BFB0027576.
- [17] S. Sanei, J. A. Chambers, and John Wiley & Sons, “EEG signal processing and machine learning,” p. 714.
- [18] H. L. Atwood and W. A. MacKay, “Essentials in Neurophysiology,” 1989.
- [19] “Neuron action potentials: The creation of a brain signal (article) | Khan Academy.” <https://www.khanacademy.org/test-prep/mcat/organ-systems/neuron-membrane-potentials/a/neuron-action-potentials-the-creation-of-a-brain-signal> (accessed May 17, 2023).
- [20] P. L. Nunez and S. J. Williamson, “Neocortical Dynamics and Human EEG Rhythms,” *Phys. Today*, vol. 49, no. 4, p. 57, Jan. 2008, doi: 10.1063/1.2807585.
- [21] Teplan, “{Fundamentals of EEG measurement},” *Meas. Sci. Rev.*, vol. 2, 2002.
- [22] M. A. Kramer, F. L. Chang, M. E. Cohen, D. Hudson, and A. J. Szeri, “Synchronization Measures of the Scalp Electroencephalogram Can Discriminate Healthy from Alzheimer’s Subjects,” *Int. J. Neural Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 61–69, Apr. 2007, doi: 10.1142/S0129065707000932.
- [23] G. Thut and C. Miniussi, “New insights into rhythmic brain activity from TMS–EEG studies,” *Trends Cogn. Sci.*, vol. 13, no. 4, pp. 182–189, Apr. 2009, doi: 10.1016/J.TICS.2009.01.004.
- [24] M. B. Sterman, L. R. Macdonald, and R. K. Stone, “Biofeedback training of the sensorimotor electroencephalogram rhythm in man: effects on epilepsy,” *Epilepsia*, vol. 15, no. 3, pp. 395–416, 1974, doi: 10.1111/J.1528-1157.1974.TB04016.X.
- [25] S. Abenna, M. Nahid, and A. Bajit, “Motor imagery based brain-computer interface: improving the EEG classification using Delta rhythm and LightGBM algorithm,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 71, p. 103102, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.BSPC.2021.103102.
- [26] S. Abenna, M. Nahid, H. Bouyghf, and B. Ouacha, “An enhanced motor imagery EEG signals prediction system in real-time based on delta rhythm,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 79, p. 104210, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.BSPC.2022.104210.
- [27] S. Ashwal and R. Rust, “Child neurology in the 20th century,” *Pediatr. Res.*, vol. 53, no. 2, pp. 345–361, Feb. 2003, doi: 10.1203/01.PDR.0000047655.66475.52.

- [28] R. I. Goldman, J. M. Stern, J. Jerome Engel, and M. S. Cohen, "Simultaneous EEG and fMRI of the alpha rhythm," *Neuroreport*, vol. 13, no. 18, p. 2487, Dec. 2002, doi: 10.1097/01.WNR.0000047685.08940.D0.
- [29] J. D. Kropotov, "Beta Rhythms," *Quant. EEG, Event-Related Potentials Neurother.*, pp. 59–76, 2009, doi: 10.1016/B978-0-12-374512-5.00003-7.
- [30] G. Pfurtscheller, D. Flotzinger, and C. Neuper, "Differentiation between finger, toe and tongue movement in man based on 40 Hz EEG," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 90, no. 6, pp. 456–460, 1994, doi: 10.1016/0013-4694(94)90137-6.
- [31] J. Gotman, J. R. Ives, and P. Gloor, "Automatic recognition of inter-ictal epileptic activity in prolonged EEG recordings," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 46, no. 5, pp. 510–520, 1979, doi: 10.1016/0013-4694(79)90004-X.
- [32] K. E. Mathewson, T. J. L. Harrison, and S. A. D. Kizuk, "High and dry? Comparing active dry EEG electrodes to active and passive wet electrodes," *Psychophysiology*, vol. 54, no. 1, pp. 74–82, Jan. 2017, doi: 10.1111/PSYP.12536.
- [33] S. Leach, K. Y. Chung, L. Tüshaus, R. Huber, and W. Karlen, "A Protocol for Comparing Dry and Wet EEG Electrodes During Sleep," *Front. Neurosci.*, vol. 14, p. 586, Jun. 2020, doi: 10.3389/FNINS.2020.00586/BIBTEX.
- [34] "Report of the committee on methods of clinical examination in electroencephalography," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 10, no. 2, pp. 370–375, May 1958, doi: 10.1016/0013-4694(58)90053-1.
- [35] T. Kayıkcıoğlu, M. Maleki, and K. Eroğlu, "Fast and accurate PLS-based classification of EEG sleep using single channel data," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 21, pp. 7825–7830, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2015.06.010.
- [36] M. Melek *et al.*, "An automatic EEG-based sleep staging system with introducing NAOsP and NAOsGP as new metrics for sleep staging systems," *Cogn. Neurodyn.*, vol. 15, no. 3, pp. 405–423, Jun. 2021, doi: 10.1007/S11571-020-09641-2.
- [37] R. Lahiri, P. Rakshit, and A. Konar, "Evolutionary perspective for optimal selection of EEG electrodes and features," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 36, pp. 113–137, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.BSPC.2017.03.022.
- [38] N. Manshouri and T. Kayıkcıoğlu, "A Comprehensive Analysis of 2D&3D Video Watching of EEG Signals by Increasing PLSR and SVM Classification Results," *Comput. J.*, May 2019, doi: 10.1093/comjnl/bxz043.
- [39] M. Melek, N. Manshouri, and T. Kayıkcıoğlu, "Low-Cost Brain-Computer Interface Using the Emotiv Epoc Headset Based on Rotating Vanes," *Trait. du Signal*, vol. 37, no. 5, pp. 831–837, Nov. 2020, doi: 10.18280/ts.370516.
- [40] N. Manshouri, M. Melek, and T. Kayıkcıoğlu, "Detection of 2D and 3D Video Transitions Based on EEG Power," *Comput. J.*, Sep. 2020, doi: 10.1093/COMJNL/BXAA116.
- [41] S. J. M. Smith and S. Smith, "EEG in neurological conditions other than epi-

- lepsy: when does it help, what does it add?," *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 76, no. suppl 2, pp. ii8–ii12, Jun. 2005, doi: 10.1136/JNNP.2005.068486.
- [42] M. Murphy and D. Öngür, "Decreased peak alpha frequency and impaired visual evoked potentials in first episode psychosis," *NeuroImage Clin.*, vol. 22, p. 101693, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.NICL.2019.101693.
- [43] A. Z. Crepeau and J. I. Sirven, "Management of Adult Onset Seizures," *Mayo Clin. Proc.*, vol. 92, no. 2, pp. 306–318, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.MAYO-CP.2016.11.013.
- [44] S. Boucetta, S. Chauvette, M. Bazhenov, and I. Timofeev, "FOCAL GENERATION OF PAROXYSMAL FAST RUNS DURING ELECTROGRAPHIC SEIZURES," *Epilepsia*, vol. 49, no. 11, p. 1925, Nov. 2008, doi: 10.1111/J.1528-1167.2008.01707.X.
- [45] E. Marosi *et al.*, "Maturation of the coherence of EEG activity in normal and learning-disabled children," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 83, no. 6, pp. 350–357, 1992, doi: 10.1016/0013-4694(92)90070-X.
- [46] N. Manshouri, M. Maleki, and T. Kayikcioglu, "An EEG-based stereoscopic research of the PSD differences in pre and post 2D&3D movies watching," *Bio-med. Signal Process. Control*, vol. 55, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.bspc.2019.101642.

Bölüm 7

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA TRİBOLOJİ

Arzu Keven¹

Canan Cimşit²

Ali İhsan Engür³

1 Kocaeli Üniversitesi Gölcük Meslek Yüksekokulu, Gölcük-Kocaeli, Türkiye
(ORCID: 0000-0003-0040-9167) arzu.keven@kocaeli.edu.tr

2 Kocaeli Üniversitesi Gölcük Meslek Yüksekokulu, Gölcük-Kocaeli, Türkiye
(ORCID: 0000-0002-3222-1735) ccimsit@kocaeli.edu.tr

3 Kocaeli Üniversitesi Gölcük Meslek Yüksekokulu, Gölcük-Kocaeli, Türkiye
(ORCID: 0000-0003-0124-5491) ali.engur@kocaeli.edu.tr



GİRİŞ

Triboloji; rölatif harekette birbirine sürtünen cisimlerin, sürtünme, yağlama ve aşınma mekanizmalarını ve olaylarını inceleyen bilim dalı olarak tanımlanır. Triboloji bilimi kendi içinde 3 ana başlıkta toplanır:

1. Sürtünme
2. Aşınma
3. Yağlama

Triboloji biliminde yapılan araştırmalar, sürtünme oranlarının tespit edilerek en uygun yağlayıcı (yoğunluğu ve kullanılacak yağın türünün belirlenmesi) seçimi ile aşınmayı önlemek ve malzemenin yâda makinanın daha uzun süreler daha verimli ve performanslı çalışmasına yardımcı olabilmek için yapılır [1]:

Bir içten yanmalı motorunun en büyük güç kaybı, termodinamik yasaları tarafından sınırlandırılan termal kayıplardır. Diğer kayıplar ise temas yüzeylerinin sürtünmesinden kaynaklanan mekanik kayıplardır. Mekanik kayıplar aktarma organları kayıpları ve motor kayıpları olarak gruplandırılabilir. Motor kayıpları supap dizisi ve yardımcı kayıplardan oluşur ancak motor sürtünmesinde güç silindiri kayıpları önemli bir yer tutar [2]. İçten yanmalı motor, fosil yakıtların yakılmasıyla mekanik enerji üretmek için kullanılmıştır. İstenilen yerde nominal güç üretmek için kullanılabildiğinden çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. İçten yanmalı motorun mekanik verimliliği öncelikle eşleşen yüzeylerin tribolojik özelliklerine bağlıdır. Silindir gömleği ve piston segmanı arasındaki sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybı %40'a kadar çıkabilir. İçten yanmalı motorun hizmet ömrü de tribolojik özelliklerinden etkilenmektedir. Piston segmanının aşınması motorun arızalanmasına yol açabilir. Aşınması yetersiz yağlama, artan yük, hız vb. nedenlerden kaynaklanabilir. İçten yanmalı motorun tribolojik performansı çalışma koşullarına, çevre koşullarına, yağlama özelliğine vb. bağlıdır. Yük, hız veya çalışma sıcaklığındaki değişimler motor tribolojisini önemli ölçüde etkiler. Atmosferik sıcaklık, piston segmanı ve silindir gömleği ara yüzeyindeki ısı transfer oranını ve yağlayıcı akışını etkiler. Yağlayıcılık eksikliği, yağlayıcı arızası, yağlayıcı kirliliği, bulutun altındaki çalışma sıcaklığı nedeniyle olabilir; İçten yanmalı motorundaki tribolojik kayıplardan sorumludur [3].

Bu çalışmada içten yanmalı motorlarda triboloji konusu ele alınmıştır. Sürtünme, aşınma ve yağlama teknolojileri incelenmiştir. Bu motorlarda sürtünme ve aşınmayı azaltmak veya kontrol altına almak için olan doğru yağlama yöntemleri, yağlayıcı maddeler ve özellikleri incelenmiştir.

1. SÜRTÜNME

Geleceğin içten yanmalı motorlarında ulaşılmak istenen üç ana hedef vardır:

1. Yüksek motor performansları
2. Düşük egzoz emisyonları
3. Yakıt ekonomisi

Bu hedefi gerçekleştirmenin yollarından birisi de motor sürtünmesini azaltmaktır. Sürtünme kayıplarının önemli bir kısmını mekanik sürtünme oluşturur. İçten yanmalı motorlardan daha iyi verim ve performans elde etmenin bir yolu da motor sürtünmesini azaltmaktır. İçten yanmalı motorlarda sürtünme yaratan en önemli etkenlerden biri piston grubudur [4].

Piston, geniş gazların enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Piston silindir gömleği veya kovani içinde hareket eder. Yanma gazlarının pistonu atlamasını önlemek ve sürtünmeyi minimumda tutmak için her pistonun etrafında birkaç metal halka bulunur. Bu segmanlar piston ile silindir duvarı arasında sızdırmazlık işlevi görür ve ayrıca piston ile silindir duvarı arasındaki temas alanını en aza indirerek sürtünmeyi azaltır. Çoğu dizel motor pistonunda, genellikle 2 ila 5 olmak üzere, her bir halkanın farklı bir işlevi yerine getirdiği birkaç halka bulunur. Üst halkalar öncelikle basınç contası olarak görev yapar. Ara bilezikler silindir duvarlarındaki yağ filmi miktarını kaldırmak ve kontrol etmek için bir silecek bileziği görevi görür. Alt halkalar bir yağlama halkasıdır ve yağlama yağının silindir duvarlarında eşit şekilde birikmesini sağlar [5].

Pistonlu bir mekanizma olarak içten yanmalı motorlarda mekanik kayıpları etkileyen dört ana sürtünme mekanizması vardır: piston ve silindir gömleği, piston segmanları ve silindir gömleği arasındaki sürtünme ve bağlantı pimi, krank mili, biyel kolu sürtünmesi. Piston, segmanlar ve rotlardan kaynaklanan kayıplar toplam mekanik kayıpların yüzde 40 ila 55'ini oluşturmaktadır. Piston ve silindir gömleği sürtünmesinin ana nedenleri şunlardır; Piston ve silindir boşluğu, Yüzey pürüzlülüğü, Piston etek yüzey profili, Yüzey sıcaklıkları ve elastik ve termal deformasyonlar, Piston malzemesi, Yağlama rejimi ve yağın yeterliliği, Piston ikincil dinamikleri [6].

Modern araçlarda yakıt tüketiminin azaltılması, teknolojilerdeki yeni inovasyonlar için ana itici güçtür. Ana stratejilerden biri, daha iyi yakıt verimliliği elde etmek için hafif malzemeler geliştirmektir. Motorlardaki sürtünme çiftlerinin sürtünme kayıplarının azaltılması da umut verici bir yön olarak kabul edilmektedir. Silindir gömleği ve piston segmanı içten yanmalı motordaki en önemli sürtünme çiftlerinden biridir ve bunların yağlama ve sürtünme özellikleri yakıt verimliliğini, sistem dayanıklılığını ve hatta içten

yanmalı motorun ömrünü doğrudan etkiler. İçten yanmalı motorlar yüksek güç yoğunluğuna ve düşük yakıt tüketimine doğru ilerlediğinde, motor basıncı ve sıcaklık önemli ölçüde artar, bu da silindir gömleği ve piston segmanı için daha kötü bir duruma yol açar. Sonuç olarak, sürtünme çiftinin daha hızlı bozulması ve daha yüksek sürtünme işi kaybı, tüm motorun performansını önemli ölçüde etkiler [7].

1.1.Piston, piston segmanları ve silindir gömleği malzemeleri

Piston malzemeleri: Dökme demir, alüminyum alaşımlı ve dökme çelik vb. bir içten yanmalı motorun pistonu için kullanılan yaygın malzemelerdir. Dökme demir pistonlar, daha ağır olmaları nedeniyle yüksek hızlı motorlar için uygun değildir. Bu pistonlar daha fazla mukavemete ve aşınmaya karşı dirence sahiptir. Alüminyum alaşımlı piston daha hafiftir ve daha yüksek termal iletkenliği nedeniyle çok daha düşük çalışma sıcaklıkları sağlar. Bu tip pistonların genleşme katsayısı saf alüminyum pistondan yaklaşık %20 daha azdır ancak dökme demir piston ve silindir duvarından daha yüksektir. Silindir duvarına göre daha yüksek genleşme nedeniyle tutukluğu önlemek için daha fazla piston boşluğu sağlanması gerekir. Motor çalıştırdıktan sonra henüz ısınma aşamasındayken piston tokatlamasına neden olur ve tepeyi pistonun eteğinden ayırma eğilimi gösterir [5].

Piston segmanı malzemeleri: Çalışma koşullarının belirlediği talepleri karşılayacak şekilde seçilir. Ayrıca, malzeme acil durumlarda bile hasara karşı dayanıklı olmalıdır. Segman malzemesinin esnekliği ve korozyon direnci gereklidir. Uygulanması halinde segman kaplamasının hem segman ve gömlek malzemeleriyle hem de yağlayıcı ile birlikte iyi çalışması gerekir. Bileziklerin bir görevi de ısıyı gömlek duvarına iletme olduğundan, iyi bir termal iletkenlik gereklidir. Piston segmanları için ana malzeme olarak gri dökme demir kullanılır. Tribolojik açıdan bakıldığında, malzemenin grafit fazının kuru yağlama etkisi yağ açlığı koşullarında ortaya çıkabileceğinden, 14 gri dökme demir faydalıdır. Ayrıca grafit fazı, kuru kalkışlarda veya benzer yağ açlığı koşullarında yağ sağlayan bir yağ rezervuarı görevi görebilir. Segmanlar için kaplamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür bir kaplamanın bir örneği, çalışma koşullarının ağır olduğu aşındırıcı ve korozif koşullarda kullanılan kromdur [8].

Silindir gömleği malzemeleri: Silindirler, alaşım elementleri olarak fosfor, manganez, krom, molibden, vanadyum ve titanyum içeren dökme demirden veya çelik ya da alüminyumdan yapılabilir. Dökme demir, büyük motorların silindir gömleklerinde en yaygın kullanılan malzemedir. Sermet (seramik-metal kompozit) kayma yüzeyli nodüler dökme demir silindirler bazı düşük hızlı iki zamanlı dizel motorlarda kullanılmıştır. Silindir gömleklerinin aşınma direncini artırmak için gömlek yüzeyi sert bir krom tabakası ile kaplanabilir. Gri dökme demir, silindir gömlekleri için kullanıldığında,

malzemenin grafit fazı kuru yağlama etkisi sağladığından ve ayrıca kuru çalıştırma veya benzer yağ açlığı koşullarında yağ sağlayan bir yağ rezervuarı görevi gördüğünden tribolojik olarak faydalıdır. Bir alüminyum silindirin aşınma direncini artırmak için, bloğun imalatı sırasında alüminyum gömleğe seramik partikül fazı dökülebilir. Alüminyum silindir blokları dökme veya preslenmiş dökme demir gömlek ile donatılabilir [8].

2. AŞINMA

Aşınma, birbiriyle temas halinde olan iki cismin bağlı hareketi sonucunda cisimlerin yüzeylerinde meydana gelen malzeme kaybıdır. Bu nedenle cisimler orijinal şekil ve boyutlarını kaybedemez ve kendilerinden beklenen işlevleri yerine getiremezler. Aşınma sadece bir malzeme özelliği değil, aynı zamanda aşınan yüzeyleri oluşturan sistemin tepkisidir. Aşınma, korozyon ve yorulma dışında endüstride en çok şikâyet edilen konulardan biridir. Bu nedenle endüstride sürtünme ve aşınmayı azaltmak veya kontrol altına almak için çalışmalar yapılmaktadır [9].

Genel olarak aşınma, (a) temas eden malzemelerin metalurjisi, (b) yüzey dokusu, (c) bileşenlerin çalışma koşulları; yük, hız, sıcaklık, vb., (d) üfleme varlığı gibi çevre, (e) yağlayıcı formülasyonları, vb. dahil olmak üzere çok sayıda faktörden etkilenen karmaşık bir süreçtir [10].

Pratik gözlemler ve teorik analizler, silindir deliklerinin en güçlü aşınmasının, termal, kimyasal, aşındırıcı ve aşındırıcı koşulların en şiddetli olduğu üst piston segmanının üst geri dönüş noktası civarında gerçekleştiği konusunda iyi bir ilişki içindedir. Yakıttaki yüksek sülfür oranı, özellikle düşük silindir yüzeyi sıcaklığında silindir deliğindeki tribokimyasal aşınma oranını önemli ölçüde artırabilir. Yakıttaki sülfürün bir sonucu olarak motorun ısınması sırasında delik yüzeyine asit yapıştığı silindir deliği yüzeyindeki aşınmanın teşvik edildiği bilinmektedir. Silindir deliğindeki yüksek aşınma ayrıca ikinci piston segmanının üst geri dönüş noktasıyla ve daha az oranda piston segmanlarının alt geri dönüş noktalarıyla ilişkilidir. Piston üzerindeki segman paketinin üzerindeki karbon birikintileri, ÜÖN (Üst Ölü Nokta) bölgesinde silindir deliği aşınmasını önemli ölçüde artırabilir. Hafif, orta ve ağır cilalama olarak alt bölümlere ayrılabilen silindir deliği cilalaması, bir silindir gömleğinde ilk aşınma oluşumudur. Hafif derecede delik parlatma yağ tüketimini artırır. Delik parlatma ağır parlatma aşamasına geldiğinde ve yağ tutucu honlama deseninin çoğu silindiğinde, yağlama açlığı ve sürtünme riski açıktır. Termal yükler, yaşlanma ve kısmi buharlaşma nedeniyle yağlayıcının bozulmasına neden olur. Kimyasal yükler yakıtla seyreltme, asidik yanma ürünleri ve yanma işleminden kaynaklanan su buharından oluşur. Aşındırıcı yükler, silindir delik yüzeyinin üst kısımları boyunca sıcak gazlarla yıkamanın mekanik etkisini ve delik yüzeyinden yağın çıkarılmasını içerir. Silindir deliğinin aşınması ayrıca yanma işleminden kaynaklanan katı

karbon partikülleri ve muhtemelen aşındırıcı aşınmaya neden olarak katkıda bulunabilecek emme havasından gelen toz tarafından hızlandırılır. Silindir deliklerinin aşınması, piston segmanı hareketinin orta strok bölgesinde de meydana gelir. Silindir deliğinin aşınması, motorun farklı çevrimleri sırasında itme kuvvetlerinin dağılımı nedeniyle deliğin itme tarafına göre itme karşısı tarafında daha yüksektir. Üç önemli aşınma mekanizması şunlardır: korozyon, aşınma ve yapışma. Motor çok soğuk ya da çok sıcak çalıştığında korozyon baskın mekanizmadır. Aşınma, sert parçacıkların kesme ve sürme etkisinden kaynaklanır. Yapışma genellikle segman ve delik arasındaki yağ filmi metal-metal teması oluşacak kadar ince olduğunda meydana gelen bir durum olarak tanımlanır. Motor çok soğuk ya da çok sıcak çalıştırıldığında korozyon baskın mekanizmadır. Özellikle, silindir duvarı sıcaklığı silindirdeki yanma ürünlerinin çığlenme noktasının altına düştüğünde aşınma oranında büyük bir artış kaydedilmiştir. Korozyon, termostat kullanımı ve motor yağlarına korozyon inhibitörleri eklenmesiyle başarılı bir şekilde azaltılmıştır. Aşınma, sert parçacıkların kesme ve sürme etkisinden kaynaklanır. Aşınmayı en aza indirmek için iki yaklaşım, sert parçacıkların (toz gibi) silindire hava ile girmesini önlemek ve yağa karışan parçacıkları uzaklaştırmaktır. Periyodik yağ değişimleri ve yağ filtreleri ile hava filtrelerinin kullanımı ve düzenli olarak değiştirilmesi rutin hale gelmiştir. Yapışma genellikle segman ve delik arasındaki yağ filmi metal metale temas edecek kadar ince olduğunda meydana gelen bir durum olarak tanımlanır. İdeal çalışma yüzeylerinin üretilmesindeki zorluklar, metal-metal temasının motorun ömrünün erken dönemlerinde gerçekleşeceği ve uzun motor ömrü için kabul edilebilir bir arayüz oluşturmak üzere 'çok tahrip edici olmayan türde' bir miktar aşınmanın gerekli olduğu anlamına gelir. Aşınma tamamlandığında, yapışma yalnızca yağ filmi kalınlığının yüzeyin pürüzlülüğünden daha az olduğu yerlerde gerçekleşmelidir. Bu durum yalnızca segman hızının sifıra düştüğü üst ölü nokta (ÜÖN) ve alt ölü nokta (AÖN) yakınlarında ve motor çalıştırıldığında, yağın çeperlerden 'boşalması' için zaman geçtikten sonra gerçekleşir [10].

3. YAĞLAMA

Yağlama, birbiriyle temas halinde olan yüzeylerin bağıl hareketinin yağlayıcı maddeler vasıtasıyla kolaylaştırılması olarak tanımlanmaktadır. Tüm mekanik sistemlerde yağlayıcıların varlığı gereklidir. [11].

Yağlamanın temel amaçları:

1. Hareket halindeki yüzeylerin temasından kaynaklanan aşınma ve ısı kaybını azaltmak, yani temas eden iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısını azaltmak,

2. Paslanmayı önlemek ve oksidasyonu azaltmak,

3. Transformator uygulamalarında yalıtkan görevi görmek,

4. Kir, toz ve suya karşı sızdırmazlık görevi görmektir. Yağlayıcı, iki hareketli yüzey arasında koruyucu bir film oluşturarak sürtünmeyi ve aşınmayı azaltan bir maddedir. Yağlama, iki yüzey bir yağlayıcı film ile ayrıldığında meydana gelir [12].

Yağlayıcılar aşağıdaki kriterlere göre sınıflandırılabilir:

Katı: Katı bir malzemenin filmi grafit, molibden disülfür ve kadmiyum disülfür gibi inorganik veya organik bileşiklerden oluşur.

Yarı katı: Sıvı, gres gibi kalınlaştırıcı ve katkı maddelerinden oluşan katı bir matris içinde asılıdır. *Sıvı:* Petrol, bitkisel, hayvansal ve sentetik yağlar gibi yağlar örnek olarak verilebilir.

Baz yağ kaynağı:

Doğal yağlar; Hayvansal yağlardan ve bitkisel yağlardan elde edilen yağlar.

Rafine yağlar; Parafinik, naftenik ve aromatik yağlar gibi ham veya petrol rezervlerinden elde edilen yağlar.

Sentetik yağlar; İhtiyaca göre uyarlanmış reaksiyonların son ürünleri olarak sentezlenen yağlar; örnekler sentetik esterler, silikonlar ve polialfaolefinlerdir.

Uygulamalar:

Otomotiv yağları; Otomobil ve ulaşım endüstrisinde kullanılır, motor yağları, şanzıman sıvıları, dişli kutusu yağları, fren ve hidrolik sıvıları örnek olarak verilebilir.

Endüstriyel yağlar; Endüstriyel amaçlar için kullanılan yağlar, makine yağları, kompresör yağları, metal işleme sıvısı ve hidrolik yağlar örnek olarak verilebilir.

Özel yağlar; Belirli işlemlere göre özel amaçlar için kullanılan yağlar; örnekler proses yağları, beyaz yağlar ve enstrümantal yağlardır.

3.1.Yağlama Rejimleri

İki kayan pürüzlü yüzeyin teması üç ana yağlama rejimi ile sonuçlanır [6]:

1. Sınır Yağlama,
2. Karışık yağlama,
3. Hidrodinamik yağlama

3.2. Yağlayıcılar

Yağlayıcılar sıvı, katı ve gaz formlarında mevcuttur. Genellikle baz yağ ve katkı maddesi olmak üzere iki ana bölümden oluşurlar. Baz yağ, yağlayıcıların en önemli bileşenidir ve bir yağlayıcı formülasyonunun yaklaşık %70-%99'unu oluşturur. Dispersan ve deterjan, aşınma önleyici, anti-oksidanlar, akma noktası düşürücü ve viskozite indeksi geliştirici gibi katkı maddeleri baz yağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. İyi bir yağlayıcı, yüksek viskozite indeksi, yüksek parlama/ateşlenme noktası, yüksek oksidatif kararlılık, düşük akma/bulutlanma noktası ve aşınma/sürtünme önleme kabiliyeti gibi arzu edilen özelliklere sahiptir [11].

3.2.1. Mineral yağlar

Yıllık madeni yağ üretiminin 30-40 milyon ton olduğu; bu bileşiklerin sürtünme ve ısıyı azaltmak, korozyon ve aşınmaya karşı korumak, enerji iletmek ve kirleticileri ortadan kaldırmak veya sızdırmazlık işlemleri gibi birçok endüstriyel uygulama için sıklıkla kullanıldığı bildirilmiştir. Toplam madeni yağ üretiminin yaklaşık %50-%75'inin kontrolsüz bir şekilde çevreye döküldüğü bildirilmiştir. Toplam madeni yağ üretiminin yaklaşık %95'i petrol bazlıdır ve genellikle mineral yağ olarak adlandırılır. Bu yağlar, 20 ila 50 karbon atomlu parafinik (doğrusal/dallı), olefinik, naftenik ve aromatik hidrokarbonların karmaşık bir karışımından oluşur. Bu formülasyonlar yenilenebilir ve toksiktir, öyle ki yağlayıcılar düşük biyolojik parçalanabilirlikleri ve yüksek toksisiteleri nedeniyle insanlar ve çevre için zararlıdır; hatta bazılarının kanserojen olduğu düşünülmektedir [13].

Mineral bazlı yağlayıcıların çoğu küresel pazarda mevcuttur ancak çok azı sentetik ve bitkisel yağlardan sentezlenmiştir. Petrol ürünlerinin fiyatları, rezervuarların hızla tükenmesi nedeniyle artmaktadır. Ayrıca, petrol yağları biyolojik olarak parçalanamaz ve toksiktir, bu da sağlık, su ve çevre sorunları yaratmaktadır. Bu nedenle, bitkisel yağlar gibi biyo-kaynaklardan yağlayıcıların sentezini artırmaya veya başka alternatifler bulmaya ihtiyaç vardır. Biyo-bazlı yağlayıcılar mineral yağlayıcılardan daha üstündür çünkü biyolojik olarak parçalanabilir, toksik olmayan yenilenebilir ve dökülmeleri çevreye zararlı değildir. Bazı araştırmacılar, bitkisel yağların uzun zincirli yağ asitleri ile birlikte polar ester gruplarına sahip oldukları için mineral ve sentetik yağlayıcılardan daha iyi yağlama özelliği gösterdiğini ortaya koymuştur. Yağ asitlerinin polar karboksil grubu metalik yüzeye yapışır ve metal-metal temasını en aza indirerek sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmak için etkili bir ince yağlama filmi oluşturur. Bitkisel yağlar, yağ asitleri bileşimindeki doymamışlık nedeniyle zayıf korozyon koruması, zayıf soğuk akış özellikleri, düşük oksidatif ve termal kararlılık gösterir. Oksidatif bozunma, yağın viskozitesini ve asitliğini artıran çözünmez tortular üretir. Esterlerin oksidasyonu ayrıca propiyonik asit, formik asit, asetik asit ve kaproik asit gibi çok aşındırıcı olan yağ

asitleri üretir. Bitkisel yağlardaki uzun zincirli yağ asitlerindeki doymamışlık daha iyi yağlama ve akış özellikleri için iyi olsa da oksidatif ve termal kararlılığı azaltır. Biyo-yağlayıcıların yağ asidi zincirleri sıcaklığa karşı çok hassastır ve yüksek sıcaklık, serbest yağ asitleri üreten oksidasyonlarına neden olur. Bu serbest yağ asitleri metalin kayan yüzeyleri arasında metalik bir sabun tabakası oluşturur ve sürtünme katsayısını etkili bir şekilde azaltır ancak bu tabaka kaymaya karşı düşük mukavemete sahiptir [6].

3.2.2. Biyoyağlayıcılar

Yeni çevresel düzenlemeleri karşılamak amacıyla, bilim camiası biyolojik olarak daha fazla parçalanabilirliğe ve daha az toksisiteye sahip yeni yağlayıcılar geliştirmektedir. Bu anlamda, biyo-bazlı kaynaklardan elde edilen yağlayıcılar (biyo-yağlayıcılar) petrolden sentezlenen geleneksel mineral yağların yerini alabilecek potansiyel alternatifler olarak ortaya çıkmıştır. Biyo-yağlayıcılar, yüksek viskozite indeksleri ve parlama noktaları gibi mükemmel fizikokimyasal özelliklerin yanı sıra kaymaya karşı iyi direnç ve yüksek biyolojik bozunabilirlik gösterirler; öyle ki bu bileşikler yenilenebilir ve biyolojik olarak kolayca bozunabilir olarak kabul edilebilir ve emülgatörler, yağlayıcılar, plastikleştiriciler, yüzey aktif maddeler, plastikler, çözücüler ve reçineler dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmalarına izin verir. Bir biyo-yağlayıcı sentezlemek için başlangıç yağının dikkatli bir şekilde seçilmesi önemlidir, çünkü çoğu durumda bitkisel yağlar gıda zincirinde kullanılmaktadır. Bu yağların endüstriyel uygulamalar için kullanılması spekülasyonların artmasına, dolayısıyla fiyatların yükselmesine ve sosyal dengesizliklere neden olabilir. Bu veriler göz önünde bulundurulduğunda en sürdürülebilir alternatif, gıda zincirine müdahale etmeyen bitkisel yağların kullanımınıdır. Biyo-yağlayıcılar, kimyasal sıvı bileşimlerine göre doğal ve sentetik yağlar olarak sınıflandırılabilir. Doğal yağlar bitkisel yağlar veya hayvansal yağlar kullanılarak yapılırken, sentetik yağlar daha gelişmiş biyo-yağlayıcılar oluşturmak için doğal yağları başlangıç malzemesi olarak kullanır. Bunlar arasında, mikroorganizmalar, alkoller, polialkoller, poliglikoller, perfloroalkillerler ve diğer türler tarafından modifikasyonu içeren ester sentezinin, sentezlenen biyo-yağlayıcının termo-oksidatif stabilite, aşınma direnci ve mineral yağlar tarafından sergilenenlerden bile daha fazla yağlama özellikleri sergileyecek şekilde doğal bir yağla aşılabilirdiği bildirilmiştir. Bununla birlikte, sentetik esterler, kimyasal modifikasyonun yağlayıcının fiyatını yükseltmesi, uçuculuğu ve toksisiteyi hafifçe artırması, sürtünme toleransını azaltması ve esterlerin modifiye edilmemiş bitkisel yağlara kıyasla mineral yağlarla iyi çalışmaması nedeniyle çeşitli sınırlamalar da göstermektedir [13].

Biyo-bazlı yağlayıcılar, uygun özellikleri ortaya çıkaran yenilenebilir olmayan yağdan yapılır. Biyo-güdümlü yağlayıcılar, fosil yağ bazlı yağlayıcılarla ilgili çeşitli pratik tercih yetenekleri sağlar. Yüksek kayganlık, yüksek parlama noktası, yüksek viskozite indeksi ve minimum buharlaşma koşullarına sahip-

tirler. Çoğunlukla, biyo-güdümlü yağlayıcı fizikokimyasal özellikleri, karbon sayısı dağılımını içeren yapı düzenlemelerine göre belirlenebilir ve ayrıca fosil yakıt değerlendirme prosedürü ile tanımlanır. Bununla birlikte, mineral yağlar karmaşık bir karışım halinde 15 veya daha fazla karbon atomuna sahip düz ve dallı zincirli naftenik ve parafinik ve aromatik hidrokarbonlardan oluşur. Bu nedenle, bu fizikokimyasal özellikler büyük ölçüde farklılık göstermektedir: hafif parafinik baz/işlem yağları için 0.820 ila yüksek aromatik baz işlem yağları için 1.0 aralığında özgül ağırlıklar ve 300 ila 600 °C arasında değişen kaynama noktaları [14].

Motorun hareketli parçalarının yağlanması, piston ve silindir parçalarında sürtünmeyi ve aşınmayı azaltır. Bu işlev motor yağlarının ana sorumluluğu olarak kabul edilirken, motor yağının diğer sorumlulukları soğutma, temizleme, pas ve korozyonu önleme olarak ifade edilebilir. Daha yüksek sıcaklık/basınçtaki çalışma koşullarında çalışan motorlarda, motor yağı asidik kirleticilere maruz kaldığı için zamanla kalitesini kaybeder. Motor yağının kalitesi büyük önem taşır. Örneğin, motor yağının kalitesi düşükse, aşınma ve yıpranmayı artıracak, parçaları yıpratacak, bakım maliyetlerini artıracak ve motor performansını düşürecektir. Biyo-yağlayıcılara olan talep, üstün fizikokimyasal özellikleri ve çevre dostu özellikleri (yani toksik olmamaları ve biyolojik olarak parçalanabilmeleri) nedeniyle artış göstermiştir [11].

Doğal Yağlar

Bitkisel yağ bazlı ürünler en zorlu çevre dostu alternatiflerden biridir. Bunun nedeni bitkisel yağların yüksek kayganlığa sahip olma anlamına gelen polarite, yüksek viskozite indeksi, yüksek parlama noktası, son derece düşük uçuculuk ve yenilenebilir olma gibi muhteşem özellikleri ve nitelikleridir. En önemlisi de biyolojik olarak parçalanabilir olmasıdır. Bitkisel yağ bazlı yağlayıcıların dünya çapında kullanılan yağlayıcıların yaklaşık %90'ının yerini alabileceği tahmin edilmektedir [16].

Sebze, meyve veya tohumlardan elde edilen yağların yanı sıra hayvanlardan elde edilen yağlar, çeşitli ekstraksiyon ve damıtma yöntemleriyle kendi yağlarını elde etmek için başlangıç malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu yağlar yaygın olarak bulunur, ucuzdur ve mineral yağlardan elde edilenlere göre daha yüksek biyolojik bozunabilirlik sergiler. Genel olarak, bitkisel yağların fizikokimyasal özellikleri serbest yağ asitlerinin bileşimine bağlıdır. Hem çevresel hem de biyolojik parametreler kimyasal bileşimi güçlü bir şekilde etkilediğinden, doğal yağlar değişken bileşimler sergiler. Bu doğal yağların biyo-yağlayıcıları sentezlemek için kullanılması tutarsızdır, çünkü çoğu gıda zincirine müdahale eder, böylece tüketilebilir bitkisel yağların fiyatları ile ilgili spekülasyonlara neden olur ve artan fiyatlar ve sosyal dengesizlikler üretir [13].

Atık bitkisel yağ veya atık yemeklik yağ, bitkisel yağ bazlı ürünler için zorlu bir hammaddedir. Bunun nedeni, dünya nüfusunun artmasına bağlı olarak gıda ve gıda endüstrilerinde artan bitkisel yağ tüketimidir. Ayrıca, herhangi bir endüstride, ana hammaddelerinin mevcudiyeti ve maliyeti, üretim veya imalat maliyetinde kilit faktörlerdir. Bu nedenle, Atık yemeklik yağın (WCO) hammadde olarak kullanılması bu engellerin çözülmesine yardımcı olacaktır [15].

Sentetik Yağlar

Sentetik esterler, bitki bazlı yağların veya hayvansal yağların kimyasal modifikasyonu ile oluşturulur. Bugüne kadar, doğal ve sentetik esterlerle ilgili biyo-yağlayıcı çalışmalarının çoğu, çeşitli kimyasal modifikasyon yöntemleri ve farklı katalitik süreçler yoluyla fizikokimyasal özelliklerini geliştirmeye odaklanmıştır. Bununla birlikte, doymamış bitkisel yağların bir sonucu olarak hala idealden daha az termal bozunma, hidroliz duyarlılığı ve oksidatif stabilite gösterdikleri için bu biyo-yağlayıcılarla ilgili gelişmeler devam etmelidir. Bu anlamda, biyo-yağlayıcı kalitesinin iyileştirilmesinde karşılaşılan temel zorluk oksidatif stabilitenin ve akma sıcaklığının artırılmasıdır. En umut verici süreçler, doymamış yağların kimyasal süreçlerle modifikasyonuna odaklanmaktadır, çünkü çift bağlar atmosferik oksijenle reaksiyona girmeye eğilimlidir. Bitkisel yağları modifiye etmek için kullanılan en yaygın stratejiler transesterifikasyon/esterifikasyon reaksiyonları, epoksidasyon, hidrojenasyon ve estolid oluşumdur [13].

3.2.3. Nanomalzeme yağlama

Yağlayıcı geliştiriciler ilk olarak on dokuzuncu yüzyılın başlarında, aşınma önleyici ve sürtünme değiştirici katkı maddeleri olarak organik sürtünme değiştiricilerle başlayarak, 2010'dan sonra nanopartiküllerin (NP'ler) kullanımına kadar devam etmiştir. Motor yağları, organik bileşikler (karbon ve hidrojen veya polialfaolefinler (PAO)) içeren petrol bazlı hidrokarbonlardan oluşan baz yağlardan formüle edilir. Motor yağları ayrıca ağırlıkça %10-30 oranında modifiye edici/katkı maddesi içerir. Yağlama, otomobiller ve ekipmanlar için sürtünen hareketli parçaların dayanıklılığını, temizliğini ve soğutmasını sağlamak ve yakıt enerjisinden tasarruf etmek için sürtünen yüzeylerin sürtünme ve aşınma oranlarını düşürmek için çok önemlidir. Araştırmacılar, ZnO, CuO, elmas, grafen oksit, TiO₂ ve Al₂O₃ gibi hem sıvı hem de katı yağlayıcılara eklenebilen nano katkı maddeleri olarak nano ölçekli malzemeler kullanarak yağlayıcıların özelliklerini geliştirmekle ilgilenmişlerdir. Nanomateryal yağlama katkıları, motorların tribolojik davranışını, yakıt ekonomisini ve yağlayıcı yaşam döngülerini iyileştirmede önemli bir role sahiptir. Çeşitli nano-yağlayıcılar arasında, kompakt ve kararlı bir yapıya ve kabul edilebilir termal kararlılığa sahip metalik oksitler umut verici yeşil yağlayıcı katkı maddeleridir. Örneğin, metalik oksit ZnO nanopartiküller geniş

yüzey alanı, yüksek yüzey enerjisi, güçlü adsorpsiyon, yüksek difüzyon, kolay sinterleme, iyi tribolojik özellikler ve düşük erime noktası gibi potansiyel avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, ZnO nanopartiküller sülfür ve fosfor içermez ve bu nedenle çevre dostudur. Literatür, ZnO nanopartiküllerin iyi sürtünme ve aşınma önleme özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir [16].

Nanoyağlayıcılar (nano boyutlu malzemelerin yağlarda dağılması) yağlamada yeni ortaya çıkan kavramlardır ve bazıları sürtünmeyi ve hareketli parçaların aşınmasını azalttığını göstermiştir. Nanomateryal katkı maddeleri sürtünmeye karşı koymaya, enerji tasarrufuna, dinamik iletimin verimliliğini artırmaya, titreşimleri sönmülemeye ve gürültüyü azaltmaya yardımcı olabilir [17].

Silindir gömleği ve piston segmanı arasındaki sürtünme durumunu iyileştirmek için, yağlayıcı katkı maddelerinin eklenmesi, düşük sürtünmeli yüzeylerin hazırlanması ve sürtünme yüzeylerinde mikro doku kullanımı gibi çeşitli yöntemler önerilmiş ve uygulanmıştır. Bunlar arasında, yüzeydeki mikro-doku, nispeten basit yöntemi ve daha iyi sürtünme önleyici etkisi nedeniyle yaygın olarak çalışılmıştır. Yüzey mikro dokusu esas olarak mekanik salmastralar, baskı yatakları, kesici takımlar ve piston gömleği gibi sürtünme yüzeylerinde belirli boyutlarda ve düzenlemelerde bir desen dizisi işlemek içindir, bu da yağ filmi oluşturmak ve korumak için yağlama yağının depolama kapasitesini artıracaktır. Bunun dışında, sürtünme yüzeyindeki mikro doku, sürtünme işlemi sırasında üretilen aşındırıcı parçacıkları bile barındırabilir. Bununla birlikte, zayıf yağlanmış veya kuru sürtünme koşulları altında yüzeydeki mikro dokunun sürtünme önleyici etkisinin tam yağlanmış koşullar kadar iyi olmadığı bulunmuştur. Bu nedenle, bu koşullara uygun olması için, mikro dokuda depolanan katı yağlayıcıların tribolojik özellikleri bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir [18].

Silindir gömleği ve piston segmanının tribolojik performansını iyileştirmenin en etkili yollarından biri, motor bileşenlerinin yağlanmasında ve soğutulmasında kilit rol oynayan yüksek kaliteli ve yüksek verimli motor yağlarını aramaktır. Genellikle, yüksek performanslı yağlama yağları baz yağ ve bir dizi özel katkı maddesinden oluşur. Viskozite indeksi geliştirici, antioksidanlar, sürtünme değiştiriciler ve aşırı basınç aşınma önleyici gibi geleneksel katkı maddeleri baz yağın yağlama özelliğini önemli ölçüde artırır. Bununla birlikte, içten yanmalı motor yağında kullanılan katkı maddelerinin çoğu, çevre kirliliğine neden olacak sülfür, fosfor, klor ve diğer çevre dostu olmayan elementler içerir. Günümüzde, nanoteknoloji ve nanomalzemelerin sürekli gelişmesiyle birlikte, araştırmacılar mükemmel performans sağlayan yağlayıcıları keşfetmek için yağlama yağına nanomalzemeler eklemek için çaba sarf etmektedir. Bir dizi çalışma, yağlayıcı katkı maddesi olarak nanopartiküllerin, benzersiz fiziksel ve reolojik özellikleri nedeniyle yağlayıcıların tribolojik davranışını önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir. Buna ek

olarak, nano yağlayıcılar bazı bitmiş yağlayıcılardan daha mükemmel aşınma ve sürtünme önleyici etkilere sahiptir. Birçok nano katkı maddesi arasında, nanodiamond (ND) kararlı kimyasal özellikleri, küresel şekli ve yüksek sertliği nedeniyle çok dikkat çekmiştir [7].

4. SONUÇ

Bu çalışmada içten yanmalı motorlarda meydana gelen sürtünme, aşınma ve yağlama konuları incelenmiştir. İçten yanmalı motorlarda sürtünme, toplam güç kaybının önemli bir bölümünü oluşturur. İçten yanmalı motorlarda iç sürtünmenin en önemli etkenlerinden biri piston grubudur. Piston grubu sürtünmesi toplam motor sürtünmesinin yaklaşık %40-55'ini oluşturduğu bilinmektedir. İçten yanmalı motorlarda sürtünme ve aşınmayı iyileştirmek için uygun yağlama sistemleri kullanılmalıdır. Ayrıca sistem için enerji tasarrufu sağlamak ve emisyon azaltmak amacıyla yüksek verimli sürtünme önleme teknolojilerinin daha da geliştirilmesi ve kullanılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Olcay, P. Ö., Triboloji ve Yağ Biliminin Günlük Hayatımızdaki Yeri ve Önemi, Namık Kemal Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2017.
- [2] B., Gullaç. Tribological Behavior Of If-Ws2 Nanoparticle additives in simulated engine conditions M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University Institute Of Science And Technology, 2009.
- [3] Sonia1, R.S. Walia1, N.M. Suri, Chaudhary, S., Tyagi, A., Potential applications of thermal spray coating for I.C. engine tribology: A Review Journal of Physics: Conference Series 1950 (2021) 012041.
- [4] Kılıç, İ. İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme Kayıpları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [5] Srinadh, M., Babu, S., Static and Thermal Analysis of Piston and Piston Rings. International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, 2015, Volume 3, Issue 8, ISSN 2349-4476.
- [6] M. Gula, Zulkiflia, N.W.M., Masjukia, H.H., Kalama, M.A., Mujtabaa, M.A., Haritha, M.H., Syahira, A.Z., Ahmede, W., Farooq, A. F., Effect of TMP-based-cottonseed oil-biolubricant blends on tribological behavior of cylinder liner-piston ring combinations, Fuel 278 (2020) 118242
- [7] Huang, R., Wang, Z., Yuan, X., Zhang, T., Ma, S., Chen, X., Xu, J., Tribological performance of nano-diamond composites-dispersed lubricants on commercial cylinder liner mating with CrN piston ring, Nanotechnology Reviews 2020; 9: 455–464.
- [8] P. Andersson, Piston ring tribology, Vtt Tiedotteita – Research Notes 2178.
- [9] Ferit Ficici, F., Kurgun, S., Analysis of Weight loss in Reciprocating Wear Test of Cylinder Liner and Piston Ring Coated with Molybdenum Arabian Journal for Science and Engineering (2021) 46:7801–7813.
- [10] O. A. Göçmen., M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University Institute Of Science And Technology, 2013.
- [11] S. Almasi, B. Ghobadian, G. Najafi, Soufi, M., A review on bio-lubricant production from non-edible oil-bearing biomass resources in Iran: Recent progress and perspectives, Journal of Cleaner Production, 290 (2021) 125830.
- [12] Mobarak, H.M., Mohamad, E., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Al Mahmud, K.A.H., Habibullah, M., Ashraful, A.M., The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 33 (2014) 34–43.
- [13] Cecilia, J., Plata, D., Saboya, R., Luna, F., Cavalcante Jr., C., Rodríguez-Castellón, E., An Overview of the Biolubricant Production Process: Challenges and Future Perspectives *Processes* 2020, 8(3), 257.
- [14] Singh, Y., Sharma, A., Singla, A., Non-edible vegetable oil-based feedstocks ca-

- pable of bio-lubricant production for automotive sector applications—a Review, *Environmental Science and Pollution Research* (2019) 26:14867–14882.
- [15] Hussein, R., Attia, A., Fouad, M., T. ElSheltawy, S., Experimental investigation and process simulation of biolubricant production from waste cooking oil Biomass and Bioenergy 144 (2021) 105850.
- [16] Ahmed Elagouz, A., Ahmed Ali, M., Xianjun, H., Abdelkareem, M., Hassan, M., Frictional performance evaluation of sliding surfaces lubricated by zinc-oxide nano-additives, *Surface Engineering*, 2020, VOL. 36, NO. 2, 144–157.
- [17] Demas, N., Timofeeva, E., Routbort, J., Fenske, G., Tribological Effects of BN and MoS₂ Nanoparticles Added to Polyalphaolefin Oil in Piston Skirt/Cylinder Liner Tests, *Tribol Lett* (2012) 47:91–102.
- [18] Fu, J., Xu, C., Ma, D., Zhu, X., Cheng, D., Yan, Z., Ma, C., Liu, G., Fu, Y., Tribological properties and releasing behavior of solid lubricant WS₂ in the dimples on cylinder liner surface of diesel engine, *Tribology International* 158 (2021) 106936.

Bölüm 8

GIDALARDA BULUNAN DOĞAL KORUYUCU SİSTEMLER

Arzu KAVAZ YÜKSEL¹



¹ Atatürk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Gıda İşleme Bölümü, Erzurum, Türkiye, ORCID NO: 0000-0001-8292-9259,
Prof. Dr., arzu-kavaz23@hotmail.com; arzukavaz@atauni.edu.tr

GİRİŞ

Gıdaların yapısında doğal olarak bulunan pek çok madde antioksidan ve antimikrobiyal özelliğe sahiptir. Antioksidanlar çeşitli maddelerin oksidasyonunu önleyen, azaltan ve en önemlisi yağların otooksidasyonunu engelleyen maddelerdir. Bunun yanı sıra, dokularda meydana gelen serbest radikallerin zararını önleyerek damar sertliği, kanser ve kalp rahatsızlıkları gibi pek çok hastalığın oluşumunu engelleyen veya azaltan kimyasal bileşenler olarak da bilinmektedirler. Bir beslenme rejiminde, diyetle birlikte alınan antioksidan maddeler oldukça fazla öneme sahiptir. Diyete dahil edilen bu antioksidan maddeler, vücudumuzdaki antioksidan savunma mekanizmasını artıran en önemli faktörlerdendir (Gordon et al., 2001).

Doğal antioksidanların en önemlilerinden biri tokoferollerdir. Bunun dışında, bazı gıdaların yapısında glukoz oksidaz, askorbik asit ve sülfiter gibi doğal antioksidan maddeler de yer almaktadır. Süperoksit dismutaz, glutatyon, peroksidaz ve katalaz gibi enzimler, bitkisel ürünler ve bazı hayvansal maddeler doğal antioksidan kaynaklarıdır. Bu kaynakların antioksidan özellikleri fenolik bileşikler, askorbik asit ve karatenoidler gibi bileşenlerden kaynaklanmaktadır (Hall, 2001).

Bitkilerin yapısında yer alan fenolik maddeler de antioksidan özelliğe sahip maddelerden biridir. Bu maddeler gıdalarda meydana getirdikleri antioksidan özelliklerin yanı sıra antimikrobiyal aktiviteleri bakımından da önemlidirler (Yalçın et al., 1997). Fenolik bileşiklerin hem gıda sanayinde ve hem de farmakolojide ki kullanımları oldukça yaygındır (Shahidi and Naczk, 1995). Çeşitli baharatların yapısında yer alan timol, eugenol, allil izotiyosiyanat humulon, kafein ve lupulon, gibi etken maddeler, Gram (+) bakteriler ile küflere karşı antimikrobiyal etki göstermektedir. Yine gıdaların yapısında yer alan doğal organik asitler de hücre içinin ve gıdanın pH değerini düşürerek, membran geçirgenliğini bozarak substrat taşınımını engellemekte veya metalleri bağlayarak antimikrobiyal etki meydana getirmektedir (Yalçın et al., 1997).

Antosiyaninler, gıda renklendiricisi özelliğine sahip olmakla birlikte *Escherichia coli*, ve *Staphylococcus aureus* gibi bazı mikroorganizmalar üzerinde antimikrobiyal etkiye sahiptir. Özellikle, meyve-sebze kabukları sağlık üzerinde pozitif yönde katkı sağlayan karotenoid, polifenol ve antosiyaninler gibi biyoaktif maddeler bakımından zengin bir kaynaktır (Kılınç et al., 2018). Genellikle bitkisel gıdalar, otlar ve baharatlar antimikrobiyal özellikteki maddeler içermektedirler. Karanfil, soğan ve sarımsakta allisin, tarçında sinnamik aldehit, adaçayı ve tarçında öjenol, hardalda izotiyosiyonat, kekik, yabani kekik ve adaçayında timol ve izotimol, anasonda anetol ve vanilyadaki vanillin örnek olarak gösterilebilir (Ünlütürk ve Turantaş, 2003). Bitkisel materyallerin yapısında ki aldehitler, ketonlar, organik asitler ve fenolikler,

mikroorganizmalar üzerinde antimikrobiyal bir etkiye sahiptir. Ayrıca, turunçgillerin kabukları doğal flavonoid kaynağıdır ve naringin, narirutin, neohesperidin ve hesperidin gibi glikozitler bakımından zengin bir kaynaktır (Şahin, 2006; Benelli et al., 2010; Khan et al., 2014).

Süt, yeni doğan yavrunun beslenmesinde ve kendini besleyecek duruma gelinceye kadar gerekli olan bütün besin maddelerini ve immün sisteminin gelişiminde destekleyici olan önemli biyoaktif bileşikleri içermektedir. Bunlar biyoaktif lipitler, biyoaktif proteinler, laktoperoksidaz, laktoferrin (LF), lizozim, nisin ve NAGase'dir. Laktoperoksidaz ve lizozim sütte yer alan antimikrobiyal özellik gösteren enzimler iken laktoferrin ise antimikrobiyal aktivite sahip bir peptittir. En önemli özelliği ortamdaki demiri bağlayarak mikroorganizmaların kullanımını engellemektir (Karagözlü ve Bayarer 2004; Adlerova et al., 2008).

Laktoperoksidaz enzimi, çiğ sütte doğal olarak bulunan ve sütün kalitesini korumak amacıyla kullanılan bir enzimdir. Bu enzim, hidrojen peroksit ve tiyosiyonat maddelerinin yardımıyla sütte aktive olmakta ve mikroorganizmalar üzerinde durdurucu veya öldürücü bir etki meydana getirmektedir (Vasavada and Cousin 2005). Laktoperoksidaz sistemi, sütün yanı sıra çeşitli süt ürünlerinde ve özellikle de peynir üretiminde kullanılmaktadır (Seifu et al., 2005). Laktoferrin, antikanser ve antiinflamatuvar aktiviteye sahip bir glikoproteindir ve özellikle bakteriler, mayalar, küfler, parazitler ve virüsler üzerinde antimikrobiyal bir etkiye sahiptir (Gonzalez-Chavez et al., 2009). Lizozim, sütün doğal yapısında yer alan ve tüm canlıların salgı bezlerinden salgılanan antimikrobiyal özellikteki hidrolitik yapıdaki bir enzimdir (Benkerroum 2008). Lizozim enzimi, mikroorganizmalar üzerinde doğrudan veya dolaylı olarak etki göstermektedir (Vasavada and Cousin 2005).

Et ve et ürünleri, laktik asit bakterileri (LAB) ve bunların ürettikleri doğal antibiyotik olan bakteriyosin bakımından önemli bir kaynaktır. LAB, etin mikroflorasında doğal olarak bulunmaktadır. Bu mikroorganizmalar, hayvanın kesimi, etin elde edilmesi, saklanması, paketlenmesi veya sucuk salam, sosis ve pastırma gibi fermente et ürünlerine işlenmesi sırasında hızlıca çoğalmaktadır (Serdaroğlu, 1987). Laktik asit üretme özellikleri ile bilinen laktik asit bakterilerinin ürettikleri protein yapısındaki ve antimikrobiyal özelliğe sahip olan antibiyotik benzeri bileşikler yani bakteriyosinler son zamanlarda büyük önem kazanmıştır. Bakteriyosinler, laktik asit bakteri türleri tarafından, ribozomal olarak sentezlenen ve belli spektrumdaki bakteriler üzerinde bakterisidal etki gösteren, ekstraselüler yapıdaki aktif proteinlerdir (Bruno and Montville 1993; Bromberg et al., 2004). Bakteriyosinlerin moleküler ağırlıkları, etki spektrumları, biyokimyasal özellikleri, genetik yapıları oldukça farklılık göstermektedir. Ayrıca hidrojen peroksit (H_2O_2), diasetil ve reuterin gibi maddeler de laktik asit bakterileri tarafından üretilen antimikrobiyal özellikteki diğer maddelerdir (Piard and Desmazeaud 1992).

ÇEŞİTLİ GIDALARDA YER ALAN DOĞAL KORUYUCU SİSTEMLER

1. Bitkilerde bulunan doğal koruyucular ve sahip oldukları etki mekanizmaları

Bitkiler, fenolikler, antosiyaninler, antioksidantlar, uçucu yağ asitleri ve organik asitler gibi antimikrobiyal ve antioksidant özellikteki çok çeşitli etken maddeler ihtiva etmektedir (Gyawali and Ibrahim 2014). Bitkilerde bulunan doğal antioksidanlar, fenolik bileşikler, karotenoidler ve vitaminlerden meydana gelmektedir (Sikora et al., 2008). Bazı fenolik bileşikler, antioksidan özelliklerinin yanı sıra, antibakteriyel ve antifungal özellikler de göstermektedirler (Soto-Vaca et al., 2012).

Reaktif oksijen türleri (ROS), singlet oksijen, süperoksit anyonu, hidroksil radikali ve lipid peroksitler gibi serbest radikalleri ihtiva etmektedir. Bunlar, hücrel enerji üretimi ve fonksiyonel aktivite sonucu meydana gelen yan metabolitlerdir. Özellikle, iyon taşınımında, apoptoz, hücre sinyali ve gen ekspresyonunda rol oynamaktadırlar. ROS düzeyi çok yükselirse, reaktif olma özellikleri fazla olduğu için lipitler, proteinler, DNA ve RNA gibi birçok molekülün hasar görmesine sebep olabilmektedirler (Lobo et al., 2010). Doğal antioksidanlar, tüketiciler tarafından güvenilir olmaları ve arzu edilmeyen yan etkilere sahip olmamaları nedeniyle yapay olanlara göre daha çok tercih edilmektedir (Pellegrini et al., 2009). Gıdalar ile dışarıdan aldığımız antioksidanlar antioksidan savunma sistemine önemli derecede fayda sunmaktadır (Pellegrini et al., 2009). Genel olarak doğal antioksidanlar, fenolikler, fenolik asitler, flavonoidler, uçucu bileşikler ve vitaminlerden oluşmaktadır. Doğal antioksidanlar gıdalarda koruyucu olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yapılan epidemiyolojik çalışmalarda, bazı bitkiler ile meyve ve sebzelerin tüketimi ile kanser ve kalp damar hastalıkları ve diğer hastalıkların meydana gelmesi arasında ters bir ilişki olduğu tespit edilmiştir (Davies, 2000). Örneğin adaçayı, üzüm çekirdeği tohumu ekstraktı, kekik, zencefil, mercanköşk, kimyon, biberiye, hardal, tarçın, sarmısak, köri, fesleğen ve aloevera, ekstraktlarından çeşitli antioksidanlar elde edilebilmektedir (Fiorentino et al., 2008; Botsoglu et al., 2007; Psczola 2001; Alzokery and Nakahara, 2003). Genel olarak karanfil, kekik, defne, biberiye ve fesleğene ait uçucu yağların özellikle *L. monocytogenes* ve bunun dışındaki diğer patojen mikroorganizmalar üzerinde antimikrobiyal etkiye sahip olduğu saptanmıştır (O'Gara et al., 2000). Yapılan çalışmalarda, rezene, nane ve kimyon gibi bitkilerin uçucu yağlarının *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Staphylococcus*, *Escherichia* ve *Proteus*'ların gelişimini engellediği belirlenmiştir (Akgül and Kıvanç, 1989).

1.1. Organik asitler: Asetik asit, laktik, süksinik, tartarik, malik, sitrik asit vb. gibi pek çok organik asit gıdalarda doğal olarak yer almaktadır. Bu maddelerin antimikrobiyal etkisi, asidin konsantrasyonuna, türüne, ortamın bileşimine, sıcaklığa, pH'ya ve hedef mikroorganizmanın özelliğine

göre değişim göstermektedir (Raybaudi-Massilia et al., 2009). Organik asitler, mikroorganizmalar üzerinde farklı etkilere sahiptir. Örneğin asetik asit, hücre duvarını geçerek hücreyi ve plazmayı denatüre etmektedir. Buna karşılık laktik asidin antimikrobiyal etkisi sınırlı olup genellikle anaerob bakteriler üzerinde etki göstermektedir (Yemenicioğlu ve Özkan 2004). Mikroorganizmaların hücre zarından geçen organik asitler, sitoplazmaya kıyasla daha düşük pH değerine sahip olduklarından iyonlaşmakta ve sitoplazmanın asitlik değerinin düşmesine neden olmaktadır. Asitlik artışı ile birlikte enzim ve proteinlerin denatürasyonu gerçekleşmekte ve hücrenin seçici geçirgenliği bozulmaktadır. Bu durum, membrandan besin maddelerinin geçişini engellenmektedir ve mikroorganizmanın canlılığını kaybetmesine neden olmaktadır (Stratford and Eklund, 2003; Raybaudi-Massilia et al., 2009).

1.2. Yağ asitleri: Yağ asitleri, Gram (+) özellikteki bakteriler ve mayalar üzerinde inhibitör etki gösteren maddelerdir. Yapılan araştırmalarda laurik, miristik ve palmitik asitlerin genel olarak bakteriler üzerinde etkili olduğu; buna karşılık kaprik ve laurik asitlerin ise mayalara karşı antimikrobiyal etki gösterdiği saptanmıştır (Ova, 2001).

1.3. Fenolik bileşikler: Fenolikler, bitkilerde yer alan sekonder metabolitlerdir ve bitkilerin kendilerine özgü lezzet ve renklerinin meydana gelmesinde görev almaktadırlar. Sahip oldukları hidroksil gruplarının sayı ve pozisyonuna bağlı olarak farklı gruplara ayrılmaktadırlar. Polifenollerin en yaygın olan grubu flavonoidlerdir (Podsek, 2007). Bitkilerde 400'den fazla flavonoid bileşik tespit edilmiş olup bunların başlıcaları antosiyanidinler, flavonlar, kateşinler, flavanonlar ve izoflavonoidlerdir. Flavonoid bileşikler meyveler, sebzeler kadar tahıllarda da bulunmaktadır. (Koca ve Karadeniz, 2005). Özellikle bitkilerin tohum, yaprak, dal, çiçek, gövde ve meyve gibi kısımlarında yer alırlar (Cemeroğlu et al., 2004). Fenolik bileşiklerin yapısında yer alan hidroksil grupları bakteriler üzerinde antimikrobiyal etkiye sahiptir (Burt 2004, Shan et al., 2007). OH gurupları mikroorganizmaların hücre membran yapısını etkilemekte ve hücre içinde yer alan maddelerin hücre dışına çıkmasını sağlamaktadır (Xue et al., 2013). Yağların oksidasyonunu önlemeleri, peroksi radikalleriyle reaksiyona girmeleri ve elektron transferi ile süperoksit ve hidroksil radikallerini yakalamalarından kaynaklanmaktadır (Koca ve Karadeniz, 2005).

1.4. Uçucu Yağlar: Uçucu yağlar, bitkinin yaprak, çiçek, meyve ve tohum vb. bölgelerinden distilasyon yöntemiyle ekstrakte edilen aromatik özellikteki yağlardır (Calo et al., 2015). Bu yağlar, fenilpropanoitler, terpenler ve terpenoitler gibi düşük molekül ağırlıklı bileşiklerden temel almaktadır (Goksen and Gumus 2021). Uçucu yağlar sahip oldukları antioksidan ve antimikrobiyal maddeler ve aroma verici özellikleri nedeniyle birçok biyoaktif bileşiklerin temel kaynaklarından biridir. Gıdalarda genellikle bozulmaları önlemek veya geciktirmek ve raf ömürlerini uzatmak amacıyla kullanılabilirler

(Solórzano-Santos and Miranda-Novales 2012; Jayasena and Jo, 2013). Bitkilerin sahip olduğu uçucu yağlar tedavi edici özellikleri yönünden farklılık göstermektedir ve yüzyıllardan beri çeşitli hastalıkların tedavi edilmesi amacıyla tıbbi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Genel olarak uçucu yağlar, antimikrobiyal, diüretik, antispazmodik ve sedatif etkiler meydana getirebilmektedir (Akgül and Kıvanç, 1989; Baydar, 2005).

1.5. C Vitamini: Bu vitamin, hem iyi bir besin elementi ve hem de iyi bir antioksidan maddedir. Özellikle lipid oksidasyonunu farklı mekanizmalarla önleyebilme kapasitesine sahiptir. Kuşburnu, turunçgiller, kabak, biber, çilek, maydanoz, ve lahanagiller önemli önemli C vitamini kaynağı olarak bilinmektedir (Koca ve Karadeniz, 2005).

1.6. Karotenoidler

Karotenoidler, pek çok sebze ve meyvelere sarı, kırmızı ve turuncu renk veren bileşenlerdir. Sahip oldukları çift bağlar kolayca okside olabilen ve stabil olmayan bir özellik göstermelerine neden olmaktadır. Karotenoidler, ksantofiller (kapsantin ve lutein) ve hidrokarbonlardan (likopen ve karoten) oluşmaktadır (Koca ve Karadeniz 2005). Sahip oldukları konjuge çift bağlar, karotenoidlere hem singlet oksijen bastırıcı ve hem de serbest radikal yakalama fonksiyonu kazandırmıştır (Podsek, 2007). Özellikle çift bağ sayısı arttıkça antioksidan aktivitenin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Antioksidan aktivitesi en yüksek karotenoid madde likopen olup bunu kriptoksantin ve karoten takip etmektedir. Özellikle sarı, kırmızı ve turuncu renkteki meyve, sebze ve diğer bitkiler önemli karotenoid kaynaklarıdır (Koca ve Karadeniz, 2005; Podsek, 2007).

1.7. Tokoferoller

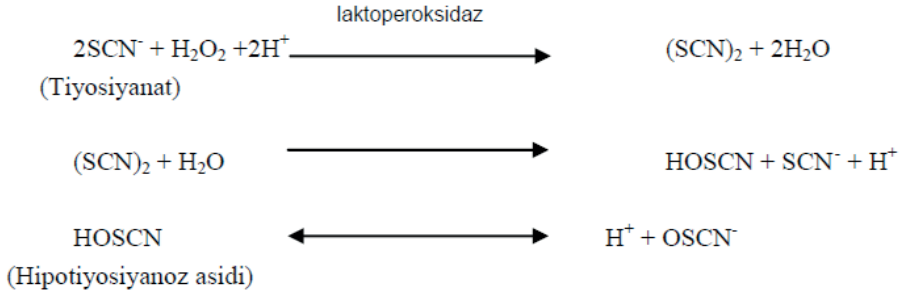
Tokoferoller, bitkisel ve hayvansal dokularda bulunan doğal antioksidan maddelerdir. Doğada yaklaşık olarak 8 tokoferol çeşidi tespit edilmiştir. Ancak bunlardan en çok antioksidan aktiviteye sahip olanları alfa, beta, gamma ve delta tokoferollerdir. Bunlar içinde antioksidan aktivitesi en yüksek olanı delta tokoferoldür ve bunu sırasıyla gamma, beta ve alfa tokoferoller izlemektedir (Sherwin, 1990, Üstün ve Turhan, 1999).

2. Sütte bulunan doğal koruyucu bileşenler ve etki mekanizmaları

2.1. Laktoperoksidaz (LP) Sistemi: Bu sistem, sütün yapısında doğal olarak bulunan laktoperoksidaz enzimi, tiyosiyanat (SCN^-) ve hidrojen peroksitten (H_2O_2) oluşmaktadır. Laktoperoksidaz (LP), peroksidaz enzim grubunun bir üyesidir. Bu enzim sütteki en önemli enzimlerden biri olup, istenmeyen mikroorganizmalara karşı yeni doğmuş yavrunun korunmasında önemli bir role sahiptir. LP, H_2O_2 'nin varlığında tiyosiyonatu okside etmektedir ve oksidasyon ürünü olarak meydana gelen hipotiyosiyanat ile antimikrobiyal bir etki meydana getirmektedir. Bu reaksiyon sonucunda, özellikle

birçok Gram (+) ve Gram (-) bakteri ile enzimlerin inhibisyonunu sağlayan bir takım ara ürünler meydana gelmektedir (Nicholette et al., 1999; Seifu et al., 2005).

Laktoperoksidaz sisteminin etki mekanizması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Doğal olarak, yeni sağılan sütler antibakteriyal etki oluşturacak seviyede laktoperoksidaz enzimi ihtiva etmektedir. LP enziminin aktivasyonundan sorumlu olan tiyosiyanat (SCN^-) ise, meme, tiroid bezleri ve tükürük gibi hayvansal dokularda ve bunların oluşturduğu salgılarda yer almaktadır. Yeni sağılan inek sütündeki ortalama miktarı 1-10 mg/L arasındadır (Madureira et al., 2007). H_2O_2 , LP sistemin aktivasyonunda gerekli olan üçüncü madde ve taze çığ sütle bulunmaz. Bazı mikroorganizmalar ve polimorfonükleer lökositler aracılığıyla üretilmektedir. Zaten çoğu laktokok, streptokok ve laktobasil aerobik şartlarda LP sistemini aktive edecek kadar H_2O_2 üretebilmektedir. (Nicholette et al., 1999; Seifu et al., 2005; Madureira et al., 2007).

LP sisteminin aktifleşebilmesi için hidrojen perokisit (H_2O_2) ve tiyosiyanat (SCN^-)'ın eşit konsantrasyonlarda sütle bulunması gerekmektedir. İnek sütünde yaklaşık olarak 10-15 mg L⁻¹ tiyosiyonat bulunmaktadır ve bu seviye LP sisteminin aktivasyonu için ideal olabilmektedir. Ancak LP sisteminin aktif hale gelmesini engelleyen en önemli faktör H_2O_2 miktarıdır. Her koşulda LP sisteminin aktif hale gelebilmesi için H_2O_2 'nin ısl işlem görmemiş sütle sonradan ilavesi önemlidir. LP sistemi, Gram (-) bakteriler üzerinde Gram (+) bakterilere göre daha fazla etki göstermektedir. LP sistemi özellikle *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, ve *Eschericia coli* gibi pekçok patojen mikroorganizmaya karşı oldukça önemli bir seviyede inhibisyon etkisi meydana getirmektedir (Madureira et al., 2007).

Süt endüstrisinde, LP sisteminden genellikle çığ sütün depolaması ve taşınma süresince bozulmasını engellemek amacıyla yararlanılmaktadır. LP sistemi bozucu mezofil bakterilerin kontrol altına alınmasında da etkili olmaktadır. Yapılan araştırmalar, LP sistemi ile çığ sütün toplanması ve nakliyesi sırasında mikrobiyolojik kalitesinin önemli ölçüde korunduğu belirlenmiştir (Seifu et al., 2005).

2. Laktoferrin (LF): Laktoferrin diğer bir adıyla laktotransferrin demir (Fe^{+3}) iyonunu bağlama yeteneğine sahip glikoproteindir ve molekül ağırlığı 76500'dür. (Adlerova et al., 2008). Düşük pH'larda demir tutma kabiliyetine sahip olduğu için pH değeri 4.5'un altına inen ortamlarda bile mikrobiyal enfeksiyonları önleme bakımından önem taşımaktadır. Büyükbaş hayvanların sütü ortalama olarak 0.02-0.35 mg/ml düzeyinde LF ihtiva etmektedir. Bu oran inek sütünde 0.2 mg/ml düzeyinde iken ağız sütündeki miktarı 1 mg/ml civarındadır. Mastitis hastalığı ise LF seviyesinde önemli derecede bir artışa neden olmaktadır (Vasavada and Cousin, 2005).

LF hem bakteriyostatik hem de bakterisidal etki meydana getirmektedir. Bilindiği üzere bakterilerin önemli bir kısmı gelişebilmeleri için demir elementine ihtiyaç duymaktadır. LF'nin demir bağlama özelliği sayesinde bakterilerin gereksinim duydukları demir bağlanmakta ve bu mikroorganizmalar demiri kullanamadıkları için çoğalmaları yavaşlamakta veya tamamen engellenmektedir. LF'nin bir diğer antibakteriyel özelliği ise LF proteinin yüzeyinde toplanan katyonların Gram (-) bakterilerinin lipopolisakkarit tabakalarıyla direkt interaksiyonundan kaynaklanmaktadır. Bu durum hücre zarının permabilitesini bozmakta ve lipopolisakkaritlerin hücre dışına akmasına neden olmaktadır. Bu da hücre bütünlüğünün kaybolmasına ve bunun neticesinde hücrenin canlılığını kaybetmesine neden olmaktadır. LF, bakteriyostatik veya bakteriyosidal bir ajan olmasının yanısıra maya, küf ve virüs gibi diğer mikroorganizmaların da çoğalmalarını engellemektedir. Ayrıca LF, antikanser aktiviteye de sahiptir. Bu özelliğinden dolayı kanser tedavisinde kullanılmaktadır (Levay and Viljoen, 1995; Farnaud and Evans, 2003).

3. Ette bulunan doğal koruyucu bileşenler ve etki mekanizmaları

3.1. 2. Laktik asit bakterileri (LAB) : Et ve et ürünleri *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus* ve *Streptococcus* gibi LAB türleri için önemli bir kaynaktır (Ünlütürk ve Turantaş, 1998).

Taze ette ki düşük karbonhidrat varlığı ve sahip olduğu kuvvetli tampon kapasitesinden dolayı LAB'leri etin istenilen özelliklerini etkileyemeyecek şekilde makul düzeyde bir laktik asit fermantasyonunun oluşumunu sağlamaktadır. Et, florasında doğal olarak yer alan laktik asit bakterileri ile fermantasyona uğramakta ve bunun sonucunda laktik asit oluşumu gerçekleşerek pH'sı düşmektedir. Et proteinleri denatüre olunca etin su tutma kapasitesi azalmakta ve su aktivitesi artmaktadır. Bu durum ise etin mikrobiyal kararlılığının azalmasına neden olmaktadır (Serdaroğlu ve Tömek, 1994). LAB doğrudan gıdaların muhafazasında önemli bir rol oynamasına rağmen kontrolsüz şartlarda çoğalan bazı LAB, çeşitli problemlerin oluşumuna neden olmaktadır. Ortamda bulunan homofermantatif LAB, karbonhidratları kullanarak % 98 oranında laktik asit üretirken, heterofermantatif olanlar laktik asitten başka etil alkol, asetik asit ve CO_2 gibi arzu edilmeyen diğer metabo-

litler üretmektedir. Heterofermantatif LAB'nin et ürünlerinde gelişimi, arzu edilmeyen aroma, CO₂ oluşumuna neden olmaları ve testürel bozuklukların oluşumunu sağlamaları nedeniyle istenmemektedir. Örneğin bu ürünlerde meydana gelen kokuşma ve yapışkanlık en sık karşılaşılan problemlerdir (Ünlütürk ve Turantaş, 1998).

3.1.2. Bakteriyosinler: Bakteriyosinler, bakteriler tarafından üretilen antimikrobiyal proteinler ve polipeptitlerdir. Protein yapısında olduklarından dolayı mide ve bağırsak sisteminde kolayca inaktif hale gelebilirler ancak ısıya karşı oldukça dayanıklılık göstermektedirler (Bruno and Montville, 1993). Bakteriyosinler, gıdalarda bulunan patojen mikroorganizmaların inaktivasyonunda, raf ömrünün uzatılmasında, fermantasyonun kontrolünde, ve mikrobiyal güvenliğin sağlanmasında rol oynayan antibiyotik benzeri bileşiklerdir (Foegeding et al., 1992). Bakteriyosinler et ürünlerine genellikle doğrudan bakteriyosin çözeltilisine daldırma, formülasyona ekleme, ve bakteriyosin üreten suşlarla inoküle etme şeklinde uygulanmaktadırlar (Okereke and Montville, 1991).

4. Çeşitli gıdalarda biyokoruyucu olarak yer alan laktik asit bakterileri ve önemli özellikleri

4.1. Genel özellikleri

LAB, gıdaların biyokontrolünde büyük bir öneme sahip olan mikroorganizma gurubudur. Gram (+) özellikteki laktik asit bakterileri kok ve basillerden oluşan bakteri cinsleridir. Bunlar, spor oluşturmazlar ve katalaz negatiftirler. Bu gurubun en önemli üyeleri arasında *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Lactococcus*, *Lactosphaera*, *Tetragenococcus*, *Carnobacterium*, *Oenococcus*, *Melissococcus*, *Weisella* ve *Vagococcus* yer almaktadır. Bu mikroorganizmalar fermente gıdalarda yer alan bakteriler olup, çeşitli gıdaların üretiminde eski yıllardan beri güvenle kullanılmaktadırlar. LAB, Gram (+), prokaryotik ve son ürün olarak laktik asit üretme yeteneğine sahip olan bakterilerdir (Bahiru et al., 2006). Bu mikroorganizma gurubu, laktik asit dışında bakteriyosin, diasetil, organik asitler, hidrojen peroksit gibi antimikrobiyal maddeler de üretebilmektedir (Herreros et al., 2005).

4.2. Laktik asit bakterilerinin ürettiği bakteriyosinler

Bakteriyosinler, protein yapısında, kısa zincirli ve küçük molekül ağırlığına sahip bazı bakteriler tarafından üretilen doğal antimikrobiyal bileşiklerdir. Etki ettikleri mikroorganizma gurupları sınırlı olup daha çok gram pozitif mikroorganizmaların inaktivasyonunu sağlamaktadırlar. Etki spektrumları ve biyokimyasal özellikleri, bakteriyosini üreten mikroorganizmaya göre değişiklik göstermektedir. Bakteriyel bir metabolitin bakteriyosin olarak kabul edilebilmesi için biyoaktif bir proteine sahip olması, inhibisyon spektrumunun belli bakteriler üzerinde olması, spesifik hücre reseptörlerine tutu-

nabilmesi, bakterisit özelliğe sahip olması, üretiminin ve konakçı hassasiyetinin plazmid kaynaklı genetik determinantlara bağlı olması ve üretiminin letal biyosentez yoluyla meydana gelmesi gerekmektedir (Park et al., 2005; Helander et al., 1997). LAB tarafından üretilen bakteriyosinler içinde en çok bilineni ve kullanılanı nisindir. Nisin genel olarak gıda sanayinde *Clostridium*'ların gelişimini engelleyici bir koruyucu olarak sıkça kullanılmaktadır (Simsek ve Bilgin, 1996).

4.2.1. Bakteriosinlerin Sahip Olduğu Genel Özellikler

- ✓ Protein yapısındaki bileşiklerdir.
- ✓ Proteolitik enzimlerle inaktive olurlar.
- ✓ Yakın akraba suşlara karşı bakterisidal etkiye sahiptirler.
- ✓ Etki ettikleri mikroorganizma gurubu kısıtlıdır. Genel olarak Gram (+) mikroorganizmalara karşı etki göstermektedirler.
- ✓ Bakteri hücrelerine zarar vermeden inaktive etme özelliğine sahiptirler. Bakteriyosinler, hücre duvarının geçirgenliğini çift yönlü artırarak sitoplazmadaki bileşenlerin hücre dışına akmasına sebep olmaktadır.

4.2.2. Gıdalara koyucu olarak bakteriyosin ilavesinin sağladığı avantajlar

- ✓ Gıdaların raf ömrünün uzatılması sağlanmaktadır,
- ✓ Genel olarak güvenlidirler yani GRAS statüsündedirler,
- ✓ Ökaryotik hücrelere karşı toksik etkiye sahip değildirler,
- ✓ Gıda kaynaklı patojen mikroorganizmaların besin zinciri yoluyla kontaminasyon riskinin azaltılmasına imkân sağlamaktadırlar,
- ✓ Farklı muhafaza koşullarında ve değişken sıcaklık ve pH derecelerinde ekstra bir koruma sağlanmaktadır,
- ✓ Kimyasal kaynaklı koruyucu gıda katkı maddelerinin kullanımları azaltılabilmektedir,
- ✓ Bozulmalar nedeniyle meydana gelen kayıplar en aza indirilmektedir,
- ✓ Doğal bir koruyucu ajan olduğu için ürünün duyuusal özellikleri ve besin değeri daha iyi muhafaza edilebilmektedir.
- ✓ Gıda kaynaklı patojen mikroorganizmalara karşı nispeten geniş aralıkta antimikrobiyal etki göstermektedirler (Thomas and Wimpenny, 1996; Gálvez et al., 2007).

4.2.3. Laktik asit bakterilerinin ürettikleri bakteriyosinler

Bu bakteriyosinler 4 grupta incelenebilir.

- ✓ Lantibiyotikler
- ✓ Isıya dayanıklı lantibiyotik olmayanlar
- ✓ Isıya duyarlı bakteriyosinler
- ✓ Kompleks bakteriyosinler

Tablo 1- Bazı laktik asit bakteri türleri tarafından üretilen bakteriyosinler (Schillinger and Lücke, 1989; Messi et al., 2001).

Laktik Asit Bakterileri	Bakteriyosinler
<i>Lactococcus</i>	Nisin Diplokokkin Laktostrepsin
<i>Pediococcus</i>	Pediosin A Pediosin PA-1
<i>Lactobacillus</i>	Helvetisin J Laktosidin Laktolin Sakasin Asidolin Laktasin B Laktasin F Plantarasin A Plantarasin B Lactocin 27

Laktik asit bakterilerinin pek çok üyesi bakteriyosin üretmektedir. Örneğin, *Lactococcus lactis* nisin, *Lactobacillus plantarum* laktolin ve *Lactobacillus acidophilus* ise acidophilin ve lactocidin üretmektedir. Bu mikroorganizmalar tarafından üretilen bakteriyosinler, bakteriyosinin özelliğine bağlı olarak *Listeria* spp. *Staphylococcus aureus*, *Clostridium perfringens* ve *Bacillus cereus* gibi gıda kaynaklı patojen mikroorganizmalar üzerinde inhibisyon etkisi meydana getirmektedir (Messi et al., 2001). Laktik asit bakterileri tarafından sentezlenen bakteriyosinler içinde *Lactococcus lactis*'in ürettiği nisin en iyi karakterize edilmiş olan bakteriyosindir. Bu bakteriyosinin, geniş bir aralıkta antimikrobiyal etki göstermesi, gıdalarda koruyucu madde olarak yıllardır güvenle kullanılıyor olması gibi olumlu özellikleri bulunmaktadır (Schillinger and Lücke, 1989).

4.3. Hidrojen Peroksit: *Lactobacillus* türleri gelişme ve çoğalmaları sırasında çeşitli mekanizmalar sonucunda H_2O_2 üretmektedirler. H_2O_2 oksitleyici bir özelliğe sahiptir ve pek çok vejetatif ve spor formundaki mikroorganizma üzerinde öldürücü etkiye sahiptir (Ünlütürk, 1999). Yapılan araştırmalar-

da, H₂O₂'nin özellikle *Pseudomonas* ve *Staphylococcus aureus* gibi bakteriler üzerinde bakteriyosidal bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir (Daeschel 1989).

4.4. Diasetil: Diasetil (2,3-bütandion), tereyağının tipik tat ve lezzetini meydana getiren aroma maddesidir ve laktik asit bakterilerinin prövattan sentezlediği önemli bir metabolittir. 300 mg/mL düzeyindeki diasetilin laktik olmayan gram pozitif bakteriler için iyi bir inhibisyon etkisine sahip olduğu gözlenmişken; 200mg/mL düzeyindeki diasetilin ise mayalar ve gram pozitif bakteriler üzerinde durdurucu ve öldürücü etkisi olduğu belirlenmiştir (Daeschel, 1989).

4.5. Reuterin: Heterofermentatif özellikteki *Lactobacillus reuterii*'nin ürettiği, molekül ağırlığı düşük buna karşılık çözünürlüğü fazla olan bir bileşendir. Özellikle *Staphylococcus*, *Salmonella*, *Shigella*, *Clostridium*, *Listeria*, *Trypanosoma* ve *Candida* gibi mikroorganizmaların gelişimini engelleyici bir özellik göstermektedir (Ünlütürk, 1999).

SONUÇ

Son yıllarda tüketiciler tarafından gıda maddelerinin korunmasında kullanılan kimyasal koruyucuların olası alternatifleri olan doğal koruyuculara ilgi giderek artmaktadır. Gıda ürünlerinde, doğal koruyucuların sentetik olanların yerini alabildiği ve aynı zamanda tüketicilerin arzu ettiği kaliteyi korumanın da mümkün olabildiği tespit edilmiştir. Yukarıda da görüldüğü gibi pek çok bitkisel ve hayvansal kaynaklı doğal koruyucu maddeler, antioksidan, antibakteriyel ve antifungal özelliklere sahiptir ve gıdaların korunmasında güvenli bir şekilde kullanılabilir. Antioksidan ve antikanser özelliklere sahip bitki özleri, antimikrobiyal ve antibakteriyel peptitler vb. gıdalarda kullanılan kimyasal koruyuculara farklı bir alternatif sunmaktadır. Yapay katkı maddelerinin olası tehlikelerine karşı artan tüketici bilinci, yerel ve güvenli, çok az işlenen veya hiç işlenmeyen gıdalara olan talebin artmasına neden olmuş ve bu da gıda kaynaklı doğal koruyucu maddelere olan ilgi ve talebi artırmıştır.

KAYNAKÇA

- Adlerova L, Bartoskova A, Faldyna M. 2008. Lactoferrin: A Review. *Veterinari Medicina* 53: 457-468.
- Akgül A, Kıvanç M. 1989. Sensitivity four foodborne moulds to essential oils from Turkish spices, herbs, and citrus peel. *J Sci Food Agric* 47: 129-132.
- Alzokery NS, Nakahara K. 2003. Antibacterial activity of extracts from some edible plants commonly consumed in Asia. *Int J Food Microbiol* 80:223-230.
- Bahiru B, Mehari T, Ashenafi M. 2006. Yeast and lactic acid flora of tej, an indigenous Ethiopian honey wine: Variations within and between production units. *Food Microbiol* 23: 277-282.
- Baydar H. 2005. Tıbbi, Aromatik ve Keyf Bitkileri Bilimi ve Teknolojisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Yayınları No: 51 (ISBN975-7929-79-4) 221 ss, Isparta.
- Benelli P, Riehl CAS, Smania Jr. A, Smania EFA, Ferreira SRS.2010. Bioactive extracts of orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) pomace obtained by SFE and low pressure techniques: Mathematical modeling and extract composition, *J Supercrit Fluids* 55: 132-141.
- Benkerroum N. 2008. Antimicrobial Activity of Lysozyme with Special Relevance to Milk. *African J Biotechnol* 7(25): 4856-4867.
- Botsoglu, N.A., Govaris, A., Giannenas, I., Papageorgiou, G. 2007. The incorporation of dehydrated rosemary leaves in the rations of turkeys and their impact on the oxidative stability of the produced raw and cooked meat. *Int J Food Sci Nutr* 58, 312- 320.
- Bromberg R, Moreno I, Zaganini CL, Delboni RR, Oliveira J. 2004. Isolation of bacteriosin-Producing Lactic Acid Bacteri from Meat Products and Its Spectrum of Inhibitory Activity. *Brazi J Microbiol* 35: 137-144.
- Bruno MEC, Montville TJ. 1993. Common Mechanistic Action of Bacteriocins from Lactic Acid Bacteria. *Appl Environ Microbiol* 59(9): 3003-3010.
- Burt S. 2004. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in food-a review. *Food Microbiol* 94: 223-253.
- Calo JR, Crandall PG, O'Bryan CA, Ricke SC. 2015. Essential oils as antimicrobials in food systems - A review. *Food Control* 54: 111-119.
- Cemeroğlu B, Yemenicioğlu A, Özkan M. 2004. Meyve ve Sebzelerin Bileşimi. Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi 1, In: Cemeroğlu B, editör. Başkent Kiliş Matbaacılık, Ankara, pp. 1-188.
- Daeschel M. 1989. Antimicrobial substances from lactic acid bacteria for use as preservatives. *Food Technol* 43(1): 164-167.
- Davies KJA. 2000. Oxidative stress, antioxidant defenses, and damage removal, repair, and replacement systems. *IUBMB Life* 50: 279-289.

- Farnaud S, Evans R. 2003. Lactoferrin-A Multifunctional Protein with Antimicrobial Properties. *Mol Immunol* 40:395-405.
- Fiorentino A, Ricci A, Dabrosca B, Pacifico S, Golino A, Piccolella S, Monaco P. 2008. Potential food additives from *Carex distachya* roots. *J Agricult Food Chem* 56: 8218-8225.
- Foegeding PM, Thomas AB, Pilkington DH, Klaenhammer TR. 1992. Enhanced control of *Listeria monocytogenes* by in-situ Produced During Dry Fermented Sausage Production. *Appl Environ Microbiol* 58: 884-887.
- Gálvez A, Abriouel H, López RL, Omar NB. 2007. Bacteriocin-based strategies for food biopreservation. *Int J Food Microbiol* 120: 51-70.
- Goksen G, Gumus P. 2021. The Future Trend Natural Preservatives in the Food System: Essential Oils. *Eur J Sci Technol (EJOSAT)* 28: 440-443.
- Gonzalez-Chavez S, Arevalo-Gallegos S, Rascon-Cruz Q. 2009. Lactoferrin: Structure, Function and Applications. *Int J Antimicrob Agents* 33: 301-309.
- Gordon M, Pokorný J, Yanishlieva N. 2001. Antioxidants in food: practical applications. CRC, 380 s.
- Gyawali R, Ibrahim SA. 2014. Natural products as antimicrobial agents. *Food Control* 46: 412-429.
- Hall C. 2001. Source of natural antioxidants: oilseeds, nuts, cereals, legumes, animal products and microbial sources. *Antioxidants in Food, Practical Applications*, J Pokorny, N Yanishlieva and M Gordon (eds), pp. 169-219, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- Helander IM, Wriht A, Sandholm TMM. 1997. Potential of lactic acid bacteria and novel antimicrobials against gram-negative bacteria. *Trends Food Sci Technol* 8:146-150.
- Herreros MA, Sandoval H, González L, Castro JM, Fresno JM, Tornadijo ME. 2005. Antimicrobial activity and antibiotic resistance of lactic acid bacteria isolated from Armada cheese (a Spanish goats' milk cheese). *Food Microbiol* 22: 455-459.
- Jayasena DD, Jo C. 2013. Essential oils as potential antimicrobial agents in meat and meat products: A review. *Trends Food Sci Technol* 34(2): 96-108.
- Karagözlü C ve Bayarer M. 2004. Peyniraltı Suyu Proteinlerinin Fonksiyonel Özellikleri ve Sağlık Üzerine Etkileri. *Ege Üniv. Ziraat Fak. Derg.* 41(2): 197-207.
- Khan MK, Huma ZE, Dangles O. 2014. A comprehensive review on flavanones, the major citrus polyphenols, *J Food Compos Anal* 33: 85-104.
- Kılınç B, Yalçın HT, Sürengil G. 2018. Meyve Kabuklarının Antimikrobiyal Özellikleri ile Yenilebilir Film Üretiminde Kullanım Potansiyelinin Belirlenmesi. *Karadeniz Fen Bil Derg* 8(1):144-157.
- Koca N, Karadeniz F. 2005. Gıdalardaki doğal antioksidan bileşikler. *Gıda* 30(4): 229-236.

- Levay P, Viljoen M. 1995. Lactoferrin: A General Review. *Haematologica* 80: 252-267.
- Lobo V, Patil A, Phatak A, Chandra N. 2010. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacogn Rev* 4: 118–126.
- Madureira AR, Pereira CI, Gomes AMP, Pintado ME, Malcata FX. 2007. Bovine whey proteins- Overview on their main biological properties. *Food Res Int* 40:1197–1211.
- Messi P, Bondi M, Sabia C, Batini R, Manicardi G. 2001. Detection and preliminary characterization of a bacteriocin (plantaricin 35d) produced by a *Lactobacillus plantarum* strain. *Int J Food Microbiol*, 64: 193-198.
- Nicholette EB, Alistair SG, Michael JL. 1999. Contribution of the lactoperoxidase system to the keeping quality of pasteurized milk. *J Dairy Res* 66: 73-80.
- O’Gara E, Hill DJ, Maslin DJ. 2000. Activities of garlic oil, garlic powder, and their diallyl constituents against *Helicobacter pylori*. *Appl Environ Microbiol* 66: 2269-2273.
- Okereke, A, Montville, TJ. 1991. Bacteriocin Inhibition of *Clostridium botulinum* spores by Lactic Acid Bacteria. *J Food Prot* 54(5): 349-353.
- Ova G. 2001. Koruyucular. Gıda katkı maddeleri. Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi s 128.
- Park JH, Seok SH, Cho SA, Baek MW, Lee HY, Kim DJ, Chung MJ, Kim SD, Hong UP, Park JH. 2005. Antimicrobial effect of lactic acid producing bacteria culture condensate mixture (LCCM) against *Salmonella enteritidis*. *Int J f Food Microbiol* 101: 111–117.
- Pellegrini N, Miglio C, Del Rio D, et al. 2009. Effect of domestic cooking methods on the total antioxidant capacity of vegetables. *Int J Food Sci Nutr* 60: 12–22.
- Piard JC, Desmazeaud M. 1992. Inhibiting factors produced by lactic acid bacteria. 2. Bacteriosins and other antibacterial substances. *Lait* 72: 113-142.
- Podsek A. 2007. Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review. *LWT* 40: 1–11.
- Pszczola, D.E. 2001. Antioxidants: From preserving food quality to quality of life. *Food Technol*, 55(6): 51-59.
- Raybaudi-Massilia RM, Mosqueda-Melgar J, Soliva-Fortuny R, Martin-Belloso O. 2009. Control pathogenic and spoilage microorganisms in fresh-cut fruits and fruit juices using traditional and alternative natural antimicrobials. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 8: 157-180.
- Schillinger U, Lücke FK. 1989. Antibacterial Activity of *Lactobacillus sake* Isolated from Meat. *Appl Environ Microbiol* 55(8): 1901-1906.
- Seifu E, Buys, EM, Donkin, EF. 2005. Significance of the lactoperoxidase system in the dairy industry and its potential applications: A review. *Trends Food Sci Technol* 16: 137-154.

- Serdaroğlu M. 1987. Türk Tipi Sucuklarda Saf Kültürlerin ve Üç Farklı Şeker Tipi Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Çalışması. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Serdaroğlu M, Tömek SO. 1994. Et Endüstrisinde Kullanılan Saf Kültürler. Ege Üniv., Mühendislik Fakültesi Dergisi. Seri B: Gıda Mühendisliği, 11: 1-2.
- Shahidi F, Naczki M. 1995. Food Phenolics, Chemistry, Effects, Applications. Technomic, USA.
- Shan B, Cai Y-Z, Brooks JD, Corke H. 2007. The in vitro antibacterial activity of dietary spice and medicinal herb extracts. Int J Food Microbiol 117(1): 112-119.
- Sherwin ER. 1990. Antioxidants. Food Additives, AL Branen, PM Davidson and S Salminen (eds), pp. 139-191, Marcel Dekker Inc., New York.
- Sikora, E.; Ciećlik, E.; Topolska, K. 2008. The sources of natural antioxidants. Acta Sci Pol Technol Aliment 7: 5-17.
- Simsek O, Bilgin B. 1996. Gıda sanayinde kullanılan laktik asit bakterilerinin oluşturdukları antibiyotiklerin biyokimyasal ve genetik özellikleri. Standart 409: 89- 96.
- Solórzano-Santos F, Miranda-Novales MG. 2012. Essential oils from aromatic herbs as antimicrobial agents. Curr Opin Biotechnol 23(2): 136-141.
- Soto-Vaca A, Gutierrez A, Losso JN, Xu Z, Finley JW. 2012. Evolution of Phenolic Compounds from Color and Flavor Problems to Health Benefits. J Agric Food Chem 60: 6658-6677.
- Stratford M, Eklund T. 2003. Organic acids and esters. In: Russell NJ, Gould GW, editors. Food preservatives. 2nd edition. London: Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 48-84.
- Şahin E. 2006. Bitkisel kaynaklı antimikrobiyallerin gıda kaynaklı bazı patojen mikroorganizmalar üzerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Gıda Mühendisliği, 69 s.
- Thomas LV, Wimpenny JWT. 1996. Investigation of the effect of combined variations in temperature, pH and NaCl concentration on nisin inhibition of *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus*. App Environ Microbiol 62: 2006-2012.
- Ünlütürk A, Turantaş F. 1998. Gıda Mikrobiyolojisi. 605 s. Mengi Tan Basımevi. İzmir.
- Ünlütürk A. 1999. Mikrobiyal gelişmenin inhibiyonu. Gıda Mikrobiyolojisi, A Ünlütürk ve F Turantaş (editör), Mengi Tan Basımevi, 2. Baskı, 171-225s, İzmir.
- Ünlütürk, A, Turantaş, F. 2003. Gıda Mikrobiyolojisi. Temiz A., Gıdalarda Mikrobiyal Gelişimi Etkileyen Faktörler. 53-82.
- Üstün NS, Turhan S. 1999. Yağ Oksidasyonu ve Antioksidanlar. OMÜ Ziraat Fak. Yardımcı Ders Notu No: 11, 81 s, Samsun
- Vasavada P, Cousin M. 2005. Dairy Science and Technology, Handbook, Volumes 13. John Wiley & Sons, 978-1-56081-078-0. Edited by: Hui YH.

- Xue J, Davidson PM, Zhong Q. 2013. Thymol nano emulsified by whey protein-maltodextrin conjugates: The enhanced emulsifying capacity and antilisterial properties in milk by propylene glycol. *J Agric Food Chem* 61(51): 12720-12726.
- Yalçın H, Yıldız H, Nergiz C. 1997. Baharatların Kimyasal Bileşimi ve Gıda Sanayinde Kullanımı. *E. Ü. Mühendislik Fakültesi Dergisi Seri B. Gıda Mühendisliği* 15: 219-228.
- Yemenicioğlu A, Özkan, M. 2004. Gıdaların başlıca dayandırılma yöntemleri. *Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi*. 2.Baskı Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi s222.

Bölüm 9

TEPKİ YÜZEY YÖNTEMİ KULLANILARAK ENİNE LAMİNASYONLU SENKRON RELÜKTANS MOTOR OPTİMİZASYONU

Hasan ÇAMCI¹

Onur Özdal MENGİ²

Serdal ARSLAN³

1 Öğr. Gör. Hasan ÇAMCI; Giresun Üniversitesi Tirebolu Mehmet Bayrak
MYO Elektrik ve Enerji Bölümü. hasan.camci@giresun.edu.tr
ORCID NO: 0000-0002-0193-9509

2 Doç. Dr. Onur Özdal MENGİ; Giresun Üniversite Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü. onur.ozdal.mengi@giresun.edu.tr
ORCID NO: 0000-0001-5669-0766

3 Dr. Öğr. Üyesi Serdal ARSLAN; Harran Üniversitesi Organize Sanayi Bölgesi
MYO Elektrik Programı. serdalarслан@harran.edu.tr
ORCID NO: 0000-0002-1187-5633

Bu çalışma Hasan ÇAMCI tarafından Doç. Dr. Onur Özdal MENGİ ve
Dr. Öğr. Üyesi Serdal ARSLAN danışmanlığında Giresun Üniversitesi Fen
Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesinde
gerçekleştirilen “Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Optimizasyonu” isimli
tez çalışmasından üretilmiştir.



GİRİŞ

Elektrik motorları, hemen hemen tüm sektörlerde kullanıldıkları için elektrik sisteminde en önemli elektriksel yük olarak bilinir. Gelişmiş ülkelerde tüketilen elektriğin yarısından fazlasını elektrik motorları kullanır. Hatta endüstriyel sektördeki elektriğin %60 ile %80'ini ve üçüncül sektördeki elektriğin yaklaşık %35'ini elektrik motorları tüketir (Haataja, 2003). Elektriğin büyük kısmı geleneksel senkron ve asenkron motorlar (ASM) tarafından tüketilmekte ancak aynı zamanda sektörde yeni motor tipleri ortaya çıkmaktadır. Hem sürücü performansı hem de verimliliği iyileştirilebilen sürekli mıknatıslı senkron motor (PMSM) ve senkron relüktans motor (SynRM) buna örnektir (Haataja, 2003).

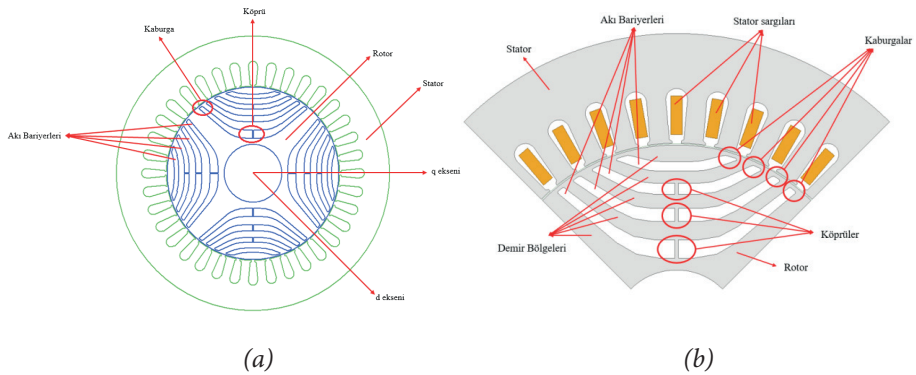
Endüstriyel motorlar arasında üretimi uzun yıllardır devam eden en ucuz elektrik motoru asenkron motorlardır. Asenkron motorlardaki kayma, motor verimini azaltır ve motor hızını kontrol etmek oldukça zordur. SynRM'ler; asenkron makineler ile aynı gövde yapısına sahip olmaları ve rotor yapılarından dolayı üretim maliyetleri düşüktür. Bu yüzden son yıllarda endüstriyel uygulamalarda SynRM gibi motor türleri önem kazanmaya başlamıştır (Boztaş, 2019).

SynRM'nin bakır veya alüminyum çubuk içermeyen rotoru sayesinde motor sıcaklığı azalmaktadır. Bunun sonucunda, SynRM'ler özellikle düşük hızlardaki yüklenebilirliği yüksektir (Bedetti ve ark., 2016). Moment yoğunluğunu artırmak için, yıldız-üçgen bağlantı şekli, nominal koşullarda geleneksel yıldız bağlantı şekline göre %5,2 daha yüksek moment yoğunluğu sağlayabilmektedir (İbrahim ve ark., 2018). Geçmişte, SynRM'ler konusunda sadece moment yoğunluğuna dikkat edilirken, son zamanlarda bu motorlar endüstri için oldukça verimli bir seçim olarak kabul edilmektedir (ABB, 2022). Rotorda sincap kafes olmaması nedeniyle, rotor bakır kaybı ortadan kalkmaktadır, motorun verimini artırırken güç faktörü azalmaktadır (Hedari ve ark., 2021). SynRM'lerin bazı dezavantajları olmasına rağmen rotor tasarımı, silisli sac türü, stator sarım konfigürasyonlarında veya hata tolerans kontrolünde yapılacak olan iyileştirmelerle daha verimli motor tasarlanması mümkündür (Tawfiq ve ark., 2021).

IEC standartlarına göre IE1 verim sınıfında bulunan asenkron motorun yeniden tasarlanan SynRM ile IE4 verim sınıfına yükseldiği gözlenmiştir (Solak ve Öner, 2020). Benzer bir çalışmada; bir asenkron motor ile aynı stator yapısını kullanan TLA rotor tipine sahip 15 KW'lık SynRM karşılaştırmasını yaparak verim değerinde %3'lük bir yükselme ve moment dalgalanmasında yaklaşık %8'lik iyileştirme sağlamışlardır (Ersöz ve ark., 2016). 22 kW Enine Lamine Anizotropik (TLA) tip SynRM asenkron motorla karşılaştırılarak ele aldıkları SynRM performansına akımın faz açısı, akı bariyer sayıları, bu bariyerlerin başlangıç çapı, radyal ve teğetsel kırımların etkilerini Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile incelemişlerdir (Özgül ve Uzun, 2021). SynRM'un rotorun-

da asimetrik bir akı bariyer yapısı kullanarak ortalama momenti düşürmeden moment dalgalanmasını en aza indirmeye çalışmışlardır (Yamamoto ve ark., 2018). SynRM'un rotor tasarımını analitik ve SEY kullanarak güç faktörü ve moment dalgalanma etkileri ile yüksek verimli SynRM tasarlamaya çalışmışlardır (Mohanarajah ve ark., 2018). Çalışmalarında rotor, optimum akı bariyeri şekilleri ile tasarlanmış ve daha sonra SynRM'nin performans parametrelerini iyileştirmek için akı bariyeri boyutlarına, akı bariyerlerinin sayısına ve akı bariyerlerinin optimum yerleşimine odaklanılmıştır (Mohanarajah ve ark., 2018). SynRM'de moment dalgalanmasını azaltmak için bariyerlerin uygun açılarda yerleştirilmesi yöntemini önermişlerdir (Lange ve ark., 2014). Üç farklı SynRM'nin analizi ve karşılaştırılmasını ele alarak akı bariyer sayılarının arttırılmasının, 12 oluk/4 kutuplu makine için ortalama momentte gözle görülür bir artışa yol açtığı ortaya konmuştur (Salah ve ark., 2020). SynRM moment dalgalanmasını azaltmak için asimetrik akı bariyeri optimizasyon tasarımı sunmuşlardır (Wang ve ark., 2015). Asimetrik akı bariyeri kullanarak ortalama moment değeri azalmadan moment dalgalanması önemli ölçüde azaltılabildiği gösterilmiştir (Wang ve ark., 2015). Altı kutuplu bir SynRM için metamodel tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı kullanarak en iyi değişkeni ve seçilen gereksinimleri belirlemeye çalışmışlardır (Ban ve Stipetic, 2022).

SynRM'lerin performansının iyileştirilmesi amacıyla yapılan bazı bilimsel araştırmalar incelendiğinde çalışmaların, optimal rotor tasarımı, manyetik çelik türü, sarım konfigürasyonları ve hata tolerans kontrolü stratejileri üzerine olduğu görülmektedir (Tawfiq ve ark., 2021). Senkron relüktans motorların moment yoğunluğu ve verimliliği rotor geometrisinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle, optimum performansı (moment yoğunluğu, verimlilik ve güç faktörü) elde etmek için SynRM rotor geometrisinin optimal tasarımı şiddetle tavsiye edilir. SynRM'ye ilişkin rotor tasarım parametreleri; kutup sayısı, bariyer sayısı, bariyer şekilleri, kaburga kalınlığı, köprü kalınlığı ve d-q eksenleri olarak özetlenebilir Şekil 1'de SynRM stator ve rotor kesiti verilmiştir.



Şekil 1. SynRM görünümü; a) SynRM'un iki boyutlu kesiti, b) SynRM'un iki boyutlu çeyrek kesiti

Şekil 1’de görülen köprü ve kaburga yapıları mıknatıs destekli senkron relüktans motor (PMSynRM) ve senkron relüktans motorun rotor tasarımındaki önemli parametrelerdendir. Kaburga yapısı akı bariyerlerini rotora bağlayan ve akı bariyerlerinin uç kısmında bulunan yapıdır. Bu yapının olmaması ideal durumdur. Fakat mekanik açıdan böyle bir durumun mümkün olmadığı bilinmektedir (Solak, 2021; Vagati ve ark., 1992). Çıkış momenti üzerinde kaburga kalınlıkları direk bir etkiye sahiptir. Bu sebeple rotorun çalışma hızına dayanabilecek kalınlıkta ve manyetik akının geçemeyeceği kadar ince olmalıdır. Tasarımda dikkat edilmesi gereken durumlardan biri de köprü yapısıdır. Köprü yapısı rotorun devir sayısına bağlı oluşan merkezkaç kuvvetlerinden dolayı akı bariyerlerinin yapısının bozulmasını önlemektedir (Solak, 2021). Fakat üretim süreçleri ve kolaylığı düşünüldüğünde kaburga kalınlığının belli bir değerin altında olmaması gerekmektedir. Aynı zamanda motorun devir sayısı da dikkate alındığında kaburga kalınlığının mekanik gerilmelere karşı dayanacak yapıda olması gerekmektedir. SynRM temel tasarım düşüncesi rotorda bulunan bariyerlerin tasarımlarına dayanmaktadır. Senkron relüktans motorların çıkış büyüklükleri üzerinde akı bariyerlerinin sayısı kadar etkili olan diğer bir tasarım parametresi tasarlanan bariyer şekilleridir. Bariyer şekillerinin özellikle moment dalgalanması üzerinde etkisi bulunmaktadır.

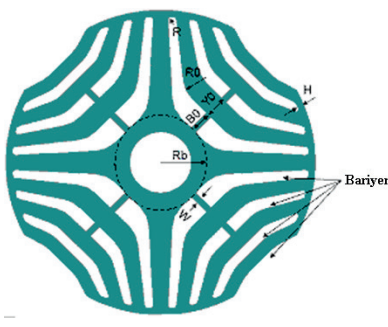
SynRM Boyutlandırma Verileri

Tablo 1’de verilen referans motora ait bilgiler dikkate alınarak senkron relüktans motor analizi gerçekleştirilmiştir. Paket boyu, stator ve rotor ölçüleri, stator ve rotor için seçilen silisli sac özellikleri ve hava aralığı ele alınan modeller için sabit tutulmuştur. Sadece rotorun büyüklüklerinin değişimi ele alınmıştır. Tablo 1-2’de motor verileri verilmiştir (Çamcı ve ark. 2022).

Tablo 1. Motora Ait Temel Büyüklükler

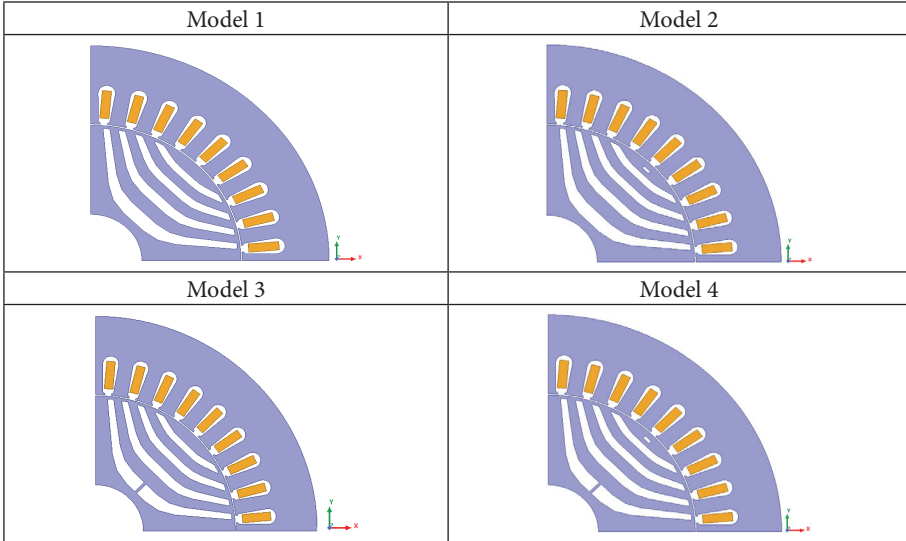
Boyutlandırma Büyüklükleri	Değeri	Birimi
Motor Gücü	4	KW
Motor Gerilimi	380	V
Bağlantı Grubu	Yıldız	-
Anma Devir Sayısı	1500	d/d
Çalışma Frekansı	50	Hz
Stator Oluk Sayısı	36	-
Kutup Sayısı	4	-
Stator Dış Çap	165	mm
Rotor Dış Çap	104	mm
Paket Boyu	135	mm

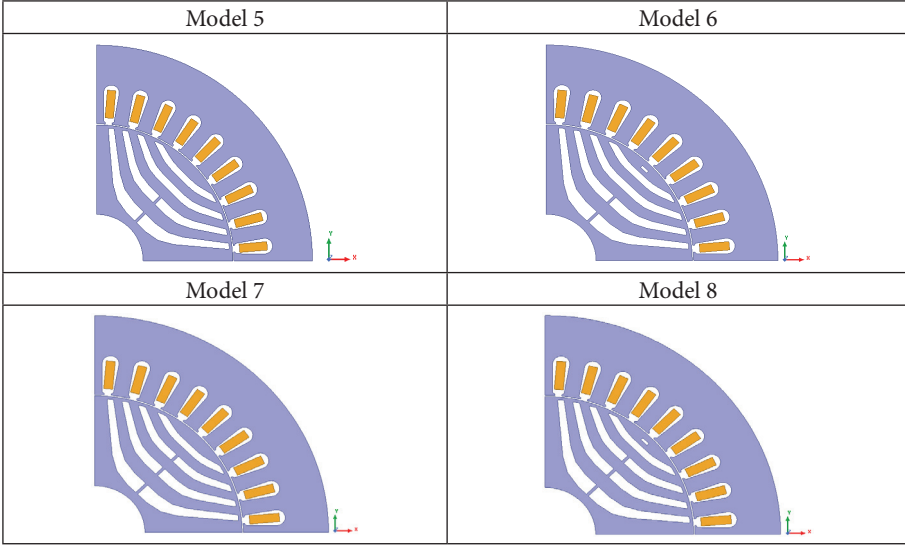
Tablo 2. Referans Motorun Rotoru İçin Büyüklükler (Çamcı ve ark. 2022)

Rotor Boyutlandırma Büyüklükleri	Değeri	Birimi	Rotor
Bariyer Sayısı	4	-	
Bariyer uç köprü kalınlığı (H)	1	mm	
Bariyer köprü genişliği (W)	1	mm	
Bariyer uç yarıçapı (R)	0,5	mm	
Bariyer köprü yüksekliği (BO)	5	mm	
Akı bariyeri demir genişliği (Y0)	5	mm	
Akı bariyeri köşe demir yarıçapı (R0)	18	mm	
Akı bariyeri başlama yarı çapı (Rb)	21	mm	

Tablo 1’de verilen veriler ve Tablo 2’de verilen rotor boyutlandırma verileri Tablo 3’te verilen farklı rotorlar için Ansys Maxwell analizi gerçekleştirilmiştir. Burada referans motorun rotorunda dördüncü akı bariyerinin üst kısmında yer alan dikdörtgen şekilli boşluğun farklı rotor modelleri için motor performansındaki etkisi incelenmiştir.

Tablo 3. Farklı Rotor Model Görünümleri





Referans motorda (Model 8) rotorun üst kısmında yer alan dikdörtgen şekilli boşluk köprü sayısına göre Model 1-Model 2, Model 3-Model 4, Model 5-Model 6, Model 7-Model 8 ikilileri olarak gösterilmiştir. Tablo 3'teki boşluklu ve boşluksuz modellerin analiz sonuçları (Tablo 4) karşılaştırılarak incelenebilir.

Tablo 4. Farklı Rotor Model İçin Motor Çıktıları

Model	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (Nm)	Faz Akımı (A)	Ld İndüktans (mH)	Lq İndüktans (mH)	Çıktı Oranı (Ld/Lq)
Model 1	39,11	7,84	13,84	144,81	20,40	7,09
Model 2	39,14	7,82	13,89	144,70	20,40	7,09
Model 3	37,59	6,65	13,41	143,99	21,29	6,76
Model 4	37,60	6,62	13,42	143,91	21,29	6,75
Model 5	36,07	7,04	12,96	143,85	22,18	6,48
Model 6	36,08	7,02	12,97	143,78	22,17	6,48
Model 7	34,69	7,60	12,56	143,41	23,03	6,22
Model 8	34,75	7,58	12,60	143,36	23,04	6,22

Tablo 4'te görüldüğü üzere dikdörtgen şekilli boşluğun motor performansında önemli değişiklik meydana getirmediği görülmüştür. Bu açıdan referans model olarak Model 7 Ansys Maxwell modelinde optimizasyon modeli olarak seçilmiştir.

Tepki Yüzey Metodolojisi (TYM)

Tepki yüzeyi metodolojisi (TYM), ilgilenilen bir çıktının çeşitli değişkenlerden etkilendiği problemleri modellemek, analiz ve optimize etmek için sıklıkla kullanılan matematiksel ve istatistiksel bir yöntemdir. Süreci etkile-

yen parametrelere bağımlı değişkenler denir (Murataliyev ve ark., 2020). Tepki yüzeyi, yüzey yerleşimini esas alan bir yöntemdir. Bu nedenle, bir TYM çalışmasının ana hedefleri, yerel maksimum, yerel, minimum ve sırt çizgilerini içeren yanıt yüzeyinin topografyasını anlamak ve en uygun yanıtın olduğu bölgeyi bulmaktır. TYM, yeni bilimsel çalışma ve ürünlerin tasarlanması, formüle edilmesi, geliştirilmesi ve analiz edilmesinde önemlidir. Ayrıca mevcut çalışmaların ve ürünlerin iyileştirilmesinde etkilidir (Arslan, 2016). TYM, girdi ve çıktı değişkenleri arasında uygun bir yaklaşıklık ilişkisini araştırır ve çalışılan bir sistem veya işletme gereksinimlerini karşılayan faktör alanının bir bölgesi için optimal çalışma koşullarını tanımlar (Arslan, 2017). Giriş değişkenlerinin değişimine göre deney tasarımı (DoE, Design of Experiment) TYM'nin en önemli parçasıdır. DoE, cevabın iyi incelenmesi gereken en uygun noktaların seçimini amaçlar. Sürecin matematiksel modeli çoğunlukla deney tasarımı ile ilgilidir. Bu nedenle, deney tasarımının seçimi, tepki yüzey yapısının doğruluğunu belirlemede büyük bir etkiye sahiptir. TYM'nin sunduğu avantajlar; değişkenler arasındaki ilişkinin belirlenmesi, sistemin matematiksel olarak modellenerek incelenmesi, deneme sayısını azaltarak maliyetten ve zamandan tasarruf edilmesi olarak özetlenebilir (Aydar, 2018).

Elektromekanik enerji dönüşümü alanında çok parametrelili benzetimler için Ansys yazılımı ve çözücü modülleri uygun bir araç olduğu görülmüştür (Balcı ve Akkaya, 2022; Arslan, 2017). Bu sebeple Tablo 3'te verilen Model 7 Ansys Rmxprt ve Maxwell modelleme ara yüzünde otomatik modellenen bildiği için Model 7 şekli referans alınarak optimizasyon işlemi yapılmıştır. Ayrıca Tablo 2'de verilen Rb uzunluğunun bariyer sayıları değişimi ile uygun olması için 18-19 mm aralığında değişecek şekilde güncellenmiştir. Tablo 1'de ve Tablo 2'de verilenler ile tanımlanan beş amaç fonksiyonu (Tablo 6) bariyer sayısı dikkate alınarak sayısal çözümleri ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'te yer alan modellerin oluşturulmasında kullanılan rotor büyüklüklerinin (*Bariyer sayısı, H, W, R, B0, Rb, Y0, R0*) ölçüleri Tablo 2'de verilmiştir. Daha sonra referans motorun stator büyüklükleri (Tablo 3-Model 8) aynı kalmak şartıyla hesaplanan optimum boyutlandırma sonuçları referans makine ile karşılaştırılarak moment, moment dalgalanması, verimde ne kadarlık değişim oluşturduğu incelenmiştir. Rotora ait *Bariyer sayısı, H, W, R, B0, Rb, Y0, R0* değişkenler minimum ve maksimum aralıkları Tablo 5'te verilmiştir (Çamcı ve ark. 2022).

Tablo 5. Rotor Tasarımı Giriş Değişkenleri ve Sınırları (Çamcı ve ark. 2022)

Rotor Boyutlandırma Büyüklükleri	Değeri	Birimi	Minimum Değeri	Maksimum Değer
Bariyer Sayısı	4	-	1	5
H	1	mm	0,5	2
W	1	mm	0	2
R	0,5	mm	0	2
Rb	18	mm	18	19
B0	5	mm	2,5	5
Y0	5	mm	2,5	5
R0	18	mm	0	36

Ansyz Maxwell'de optimizasyon aracı altında DoE tercih edilerek TYM ile Tablo 6'da verilen amaç fonksiyonları sırasıyla sınanmıştır. Bu yöntemde giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki ilişki grafik olarak alınabilmektedir. Özellikle bu değişimler hangi rotor büyüklüklerinin çıkış değişkenleri üzerinde etkisinin yüksek olduğunu belirlemeyi sağlamaktadır. Tepki Yüzey Metodolojisi için tasarım giriş değişkenlerine göre yazılım tarafından 161 tasarım noktası (DoE) oluşturulmuştur. Bariyer sayısı tam sayı olarak yazılımda üretilebilir değer içerisinde tanımlanmıştır. Diğer giriş değişkenleri belirlenen aralıkta değişmektedir (Tablo 5). Ayrıca Tablo 6'da yer alan Amaç Fonksiyonu 1 için optimizasyon modülünde ayrı ayrı amaç tanımlanmasında maksimum ve/veya minimum operatör olarak yazılım izin vermemektedir. Bu nedenle A.F.1'de yer alan hedef büyüklükler için sınır değerleri girilmiştir. Bu çalışmada yer alan amaç fonksiyonlarına benzer amaç fonksiyonları, farklı makineler için önerilmiştir. Örneğin hat başlatmalı sürekli mıknatıslı motor için maliyet ve ağırlık içeren optimizasyon incelenmiştir (Topaloğlu ve ark., 2014), yine benzer bir yaklaşım tüp tipi doğrusal jeneratör için tepki yüzeyi metodolojisi ve çok amaçlı genetik algoritma ile optimizasyon çalışması incelenmiştir (Arslan ve ark., 2020). Burada ele alınan amaç fonksiyonları referanslarda belirtilen maliyet ve ağırlık yerine moment dalgalanması olarak ele alınmıştır. Tablo 6'da verilen amaç fonksiyonları doğrultusunda TYM ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6. Tepki Yüzey Metodolojisi için tanımlanan amaç fonksiyonları (Çamcı ve ark. 2022)

Amaç Fonksiyonu	Amaç Tanımlamaları	Operatör	Değeri	Ağırlık	Birimi
Amaç fonksiyonu 1 (A.F.1)	<i>Moment</i>	\geq	34	1	Nm
	<i>Moment Dalgalanması</i>	=	0	1	Nm
	<i>Verim</i>	=	1	1	-

Amaç fonksiyonu 2 (A.F.2)	<i>Moment * Verim</i> <i>Moment Dalgalanması</i>	Maksimize	-
Amaç fonksiyonu 3 (A.F.3)	<i>Moment * Verim</i>	Maksimize	-
Amaç fonksiyonu 4 (A.F.4)	<i>Verim</i> <i>Moment Dalgalanması</i>	Maksimize	-
Amaç fonksiyonu 5 (A.F.5)	<i>Verim</i>	Maksimize	-

A.F.1: Moment, moment dalgalanması ve verim değeri için ulaşılması hedeflenen değerler tanımlanmıştır.

A.F.2: A.F.1 için verilen üç ayrı motor verisi tek bir eşitlikle ifade edilerek genel performans artışı hedeflenmiştir. Üç büyüklük için negatif tam sayılı ifade olmadığından dolayı ifadeyi maksimum yapacak en uygun boyutlandırma verisi elde edilmeye çalışılmıştır.

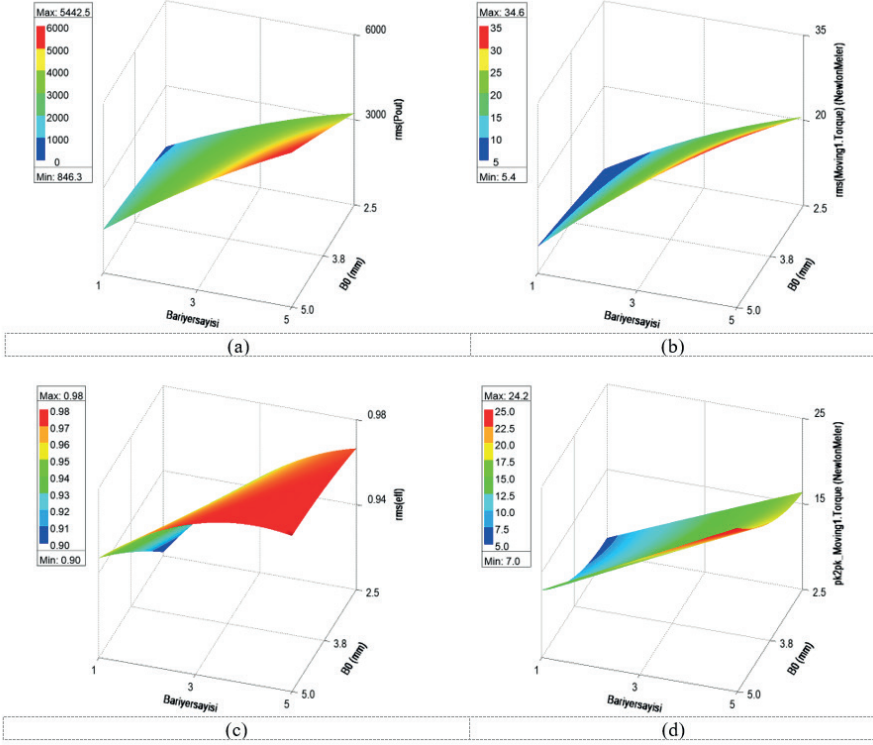
A.F.3: Moment ve verimi yükseltecek boyutlandırma büyüklüğünün bulunması hedeflenmiştir.

A.F.4: Motor veriminin artışı beklenirken aynı zamanda moment dalgalanmasını azaltan boyutlandırma büyüklüğünün elde edilmesi hedeflenmiştir.

A.F.5: Sadece verimi maksimum edebilecek boyutlandırma büyüklüklerinin bulunması amaçlanmıştır.

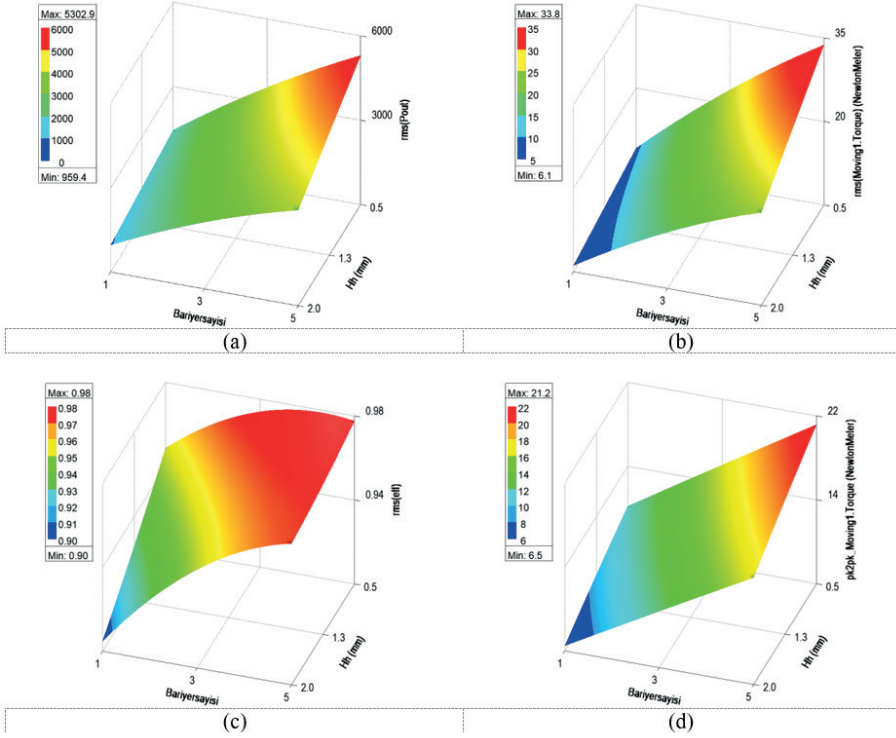
ARAŞTIRMA BULGULARI

Şekil 2-8 ile verilen grafiklerde giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki ilişki grafiksel olarak incelenmiştir. Grafikler dikkate alınarak çıkış değişkeni üzerinde önemli değişime sebep olmayan giriş değişkeni optimizasyon sürecinden çıkartılabilir. Bu yöntem ile ileride gerçekleştirilecek optimizasyon uygulamaları için değişkenlerin ve sınırlarının belirlenmesine de yardımcı olacaktır. Moment, moment dalgalanması ve verim A.F.1’de ayrı ayrı ve eşit ağırlıkta tanımlandığından dolayı rotor büyüklükleri ile değişimi bariyer sayısı dikkate alınarak incelenmiştir.



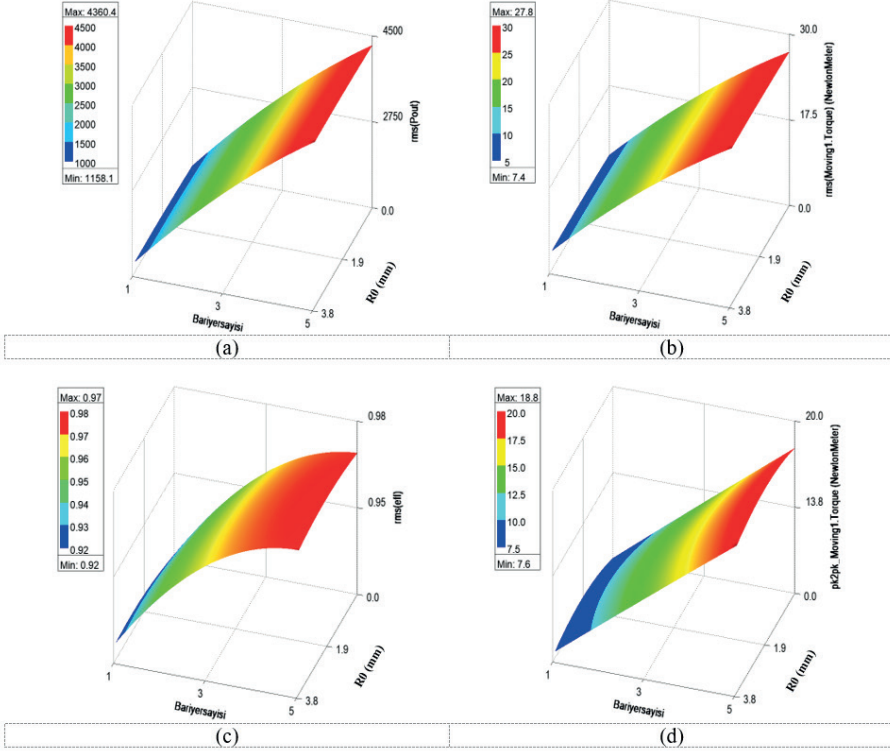
Şekil 2. Giriş değişkeni B_0 ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b) Moment, c) Verim, d) Moment dalgalanması

Burada bariyer sayısının artışı çıkış gücü, moment, verim ve moment dalgalanmasını arttırmaktadır. B_0 değişimi özellikle moment dalgalanması üzerinde etkisi az olmasına karşın düşük bariyer sayısında verim, çıkış gücü ve moment üzerinde etkilidir. B_0 'ın düşük değerliliklerinde moment dalgalanması azalmaktadır. Bariyer köprü yüksekliği; 3, 4 ve 5 bariyer durumunda motor verimini çok az etkilemektedir.



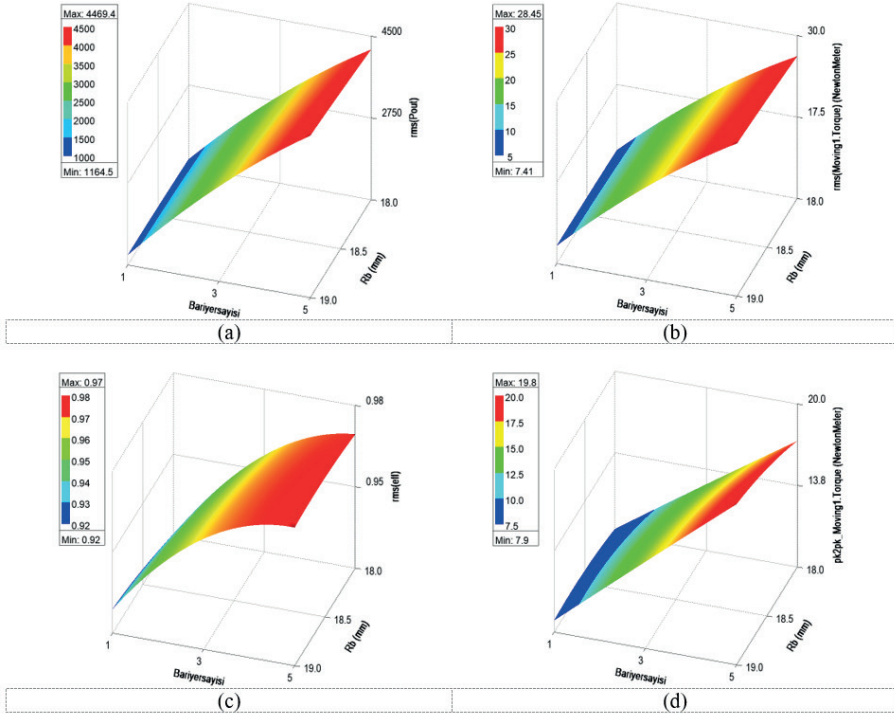
Şekil 3. Giriş değişkeni H ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b) Moment, c) Verim, d) Moment dalgalanması

Burada bariyer sayısının artışı ve bariyer uç köprü kalınlığının azalması çıkış gücü, moment, verim ve moment dalgalanmasını arttırmaktadır. H değişimi özellikle moment dalgalanması üzerinde etkisi az olmasına karşın düşük bariyer sayısında verim, çıkış gücü ve moment üzerinde etkilidir.



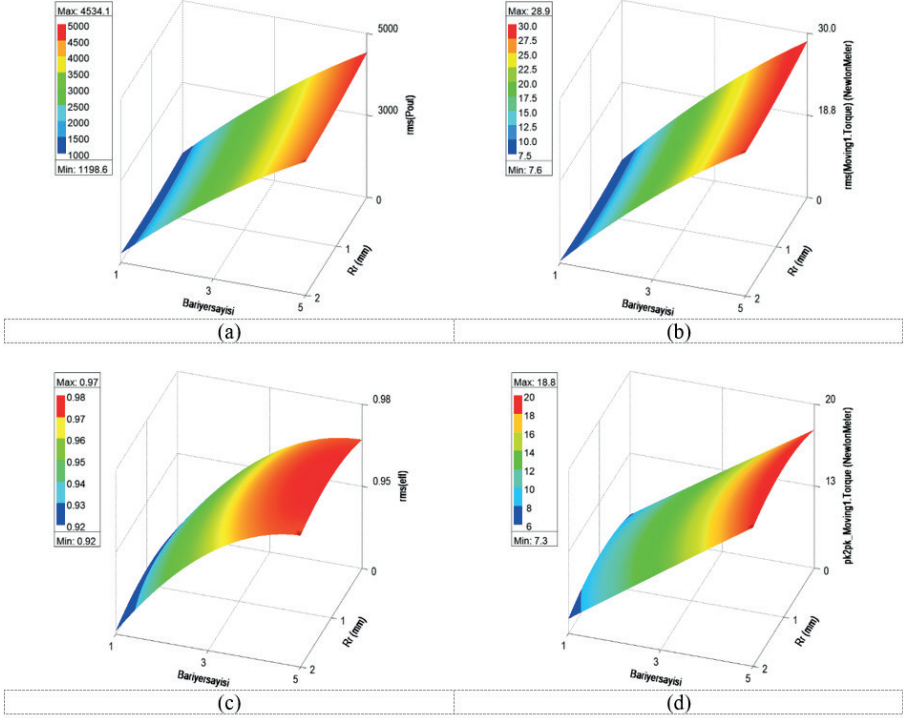
Şekil 4. Giriş değişkeni RO ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b) Moment, c) Verim, d) Moment dalgalanması

Şekil 4'te akı bariyeri köşe demir yarıçapı değişimi çıkış gücü ve momenti etkilememektedir. Verim ve moment dalgalanmasını çok az etkilemektedir. Bariyer sayısının artışı çıkış gücü, moment ve moment dalgalanmasını yaklaşık doğrusal olarak arttırmaktadır.



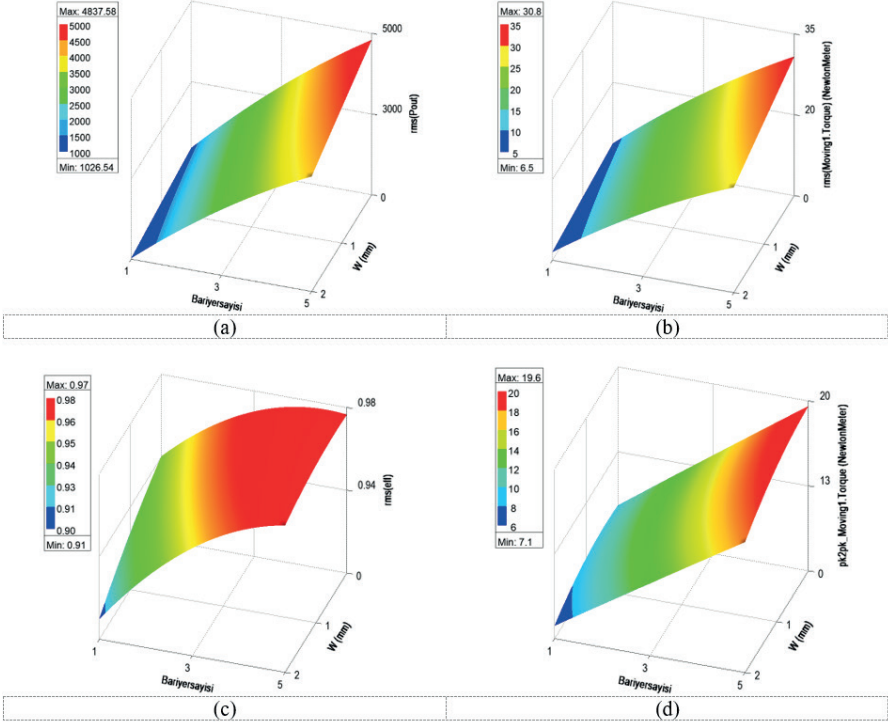
Şekil 5. Giriş değişkeni R_b ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi;
 a) Güç değişimi, b) Moment, c) Verim, d) Moment dalgalanması

Burada akı bariyeri başlama yarı çapı değişimi verim ve moment dalgalanmasını çok az etkilemesine karşın çıkış gücü ve momenti etkilememektedir. Bariyer sayısının artışı çıkış gücü, moment ve moment dalgalanmasını yaklaşık doğrusal olarak arttırmaktadır.



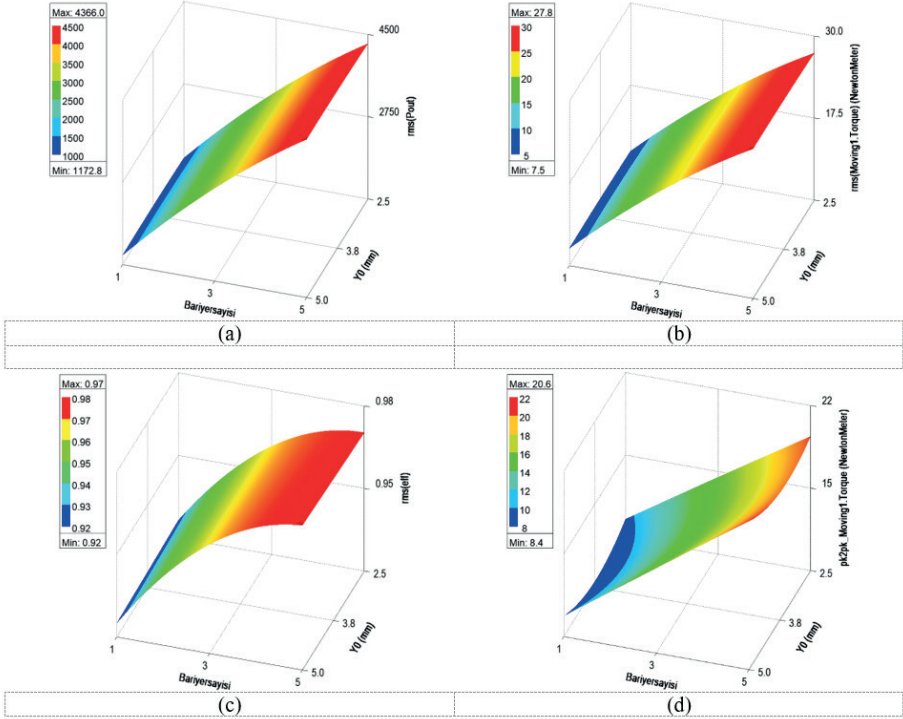
Şekil 6. Giriş değişkeni R ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b) Moment, c) Verim, d) Moment dalgalanması

Burada bariyer sayısının artışı çıkış gücü, moment ve moment dalgalanmasını arttırmaktadır. Bariyer uç yarıçapı çıkış gücü, moment, verim ve moment dalgalanmasını çok az etkilemektedir.



Şekil 7. Giriş değişkeni W ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b) Moment, c) Verim, d) Moment dalgalanması

Burada çıkış gücü, moment, verim ve moment dalgalanmasını oldukça etkilemektedir. Bariyer sayısı ile değişimi dikkate alındığında özellikle W uzunluğunun azalması motor performansını arttırmaktadır. Motor performansı artarken aynı zamanda moment dalgalanmasının artması nedeniyle bariyer köprü genişliğinin uygun seçilmesi elzemdir. Bu açıdan bariyer köprü genişliği değişimi rotor parametreleri içerisinde en önemli parametre olduğu söylenebilir. Diğer parametre değişimleri gibi bariyer sayısının artışı; çıkış gücü, moment, verim ve moment dalgalanmasını arttırmaktadır.



Şekil 8. Giriş değişkeni Y_0 ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b) Moment, c) Verim, d) Moment dalgalanması

Burada akı bariyeri demir genişliği değişimi; moment, çıkış gücü ve verimdeki değişim bariyer sayısına göre değişmektedir. Bariyer sayısının artışı çıkış gücü, moment ve moment dalgalanmasını arttırmaktadır. Ayrıca moment dalgalanmasındaki değişim dikkate alındığında Y_0 'ın düşük ve yüksek değerlerindeki moment dalgalanması sebebiyle uygun değerde alınması gerekmektedir. Rotor giriş değişkenlerine göre moment ve çıkış gücü değişimi benzer değişim sergilemesine karşın verim ve moment dalgalanması değişimi farklıdır. Bariyer sayısı arttıkça moment dalgalanması artmasına karşın motor performansı da artmaktadır. Rotor değişkenlerini ve motor performansını içeren optimizasyon çalışmaları için bariyer sayısı en az üç alınmalıdır. Daha düşük bariyer sayılarında motor performansı oldukça küçülmektedir. Tablo 6'da yer alan amaç fonksiyonları üzerinden optimizasyon gerçekleştirildiğinde rotor boyutlandırması için elde edilen uygun değerler Tablo 7'de ve performans verileri ise Tablo 8'de verilmiştir:

Tablo 7. Amaç Fonksiyonlarına Göre Rotor Boyutlandırması İçin Optimum Değerler

	Bariyer Sayısı	H	W	R	Rb	B0	Y0	R0
AMAÇ FONKSİYONU 1	5	2 mm	0	0	18 mm	5 mm	2,5 mm	0
AMAÇ FONKSİYONU 2	5	2 mm	0	0	18 mm	2,5 mm	5 mm	0
AMAÇ FONKSİYONU 3	5	0,5 mm	0	0	18 mm	5 mm	5 mm	36 mm
AMAÇ FONKSİYONU 4	5	0,5 mm	0	2 mm	19 mm	5 mm	5 mm	36 mm
AMAÇ FONKSİYONU 5	5	0,5 mm	0	2 mm	18 mm	5 mm	5 mm	0

Tablo 8. Amaç Fonksiyonlarına Göre Tanımlanan Çıkış Parametreleri

	Çıkış gücü (W)	Verim	Moment (Nm)	Moment Rıplılı	Faz Akımı (A)	Çıkıntı Oranı (Ld/Lq)	İterasyon Numarası
AMAÇ FONKSİYONU 1	5045	0,96	32,12	19,06	17,68	5,88	48
AMAÇ FONKSİYONU 2	3041	0,95	19,36	12,68	11,37	4,20	46
AMAÇ FONKSİYONU 3	7431	0,97	47,31	26,24	22,86	10,18	56
AMAÇ FONKSİYONU 4	6974	0,977	44,4	31,36	21,71	9,8	152
AMAÇ FONKSİYONU 5	7014	0,98	44,65	25,85	21,18	9,74	104
REFERANS MOTOR-4 Bariyer	5457,2916	0,9619	34,74	7,32	12,64	6,25	-

Tablo 8’de verilen veriler değerlendirildiğinde Tablo 9 oluşturulmuştur. Çıkış büyüklüklerine göre A.F.1 ve A.F.2 sonuçları referans motora nazaran düşük olmasına karşın A.F.3, A.F.4 ve A.F.5 daha iyi sonuçlar göstermiştir.

Tablo 9. Amaç Fonksiyonları Sonuçlarına Göre Referans Motor Karşılaştırılması

	A.F.1	A.F.2	A.F.3	A.F.4	A.F.5	REFERANS MOTOR
Çıkış gücü (W)	-%7,554	-%44,276	+%36,166	+%27,792	+%28,525	-
Verim	-%0,197	-%1,237	+%0,842	+%1,569	+%1,881	-
Moment (Nm)	-%7,541	-%44,271	+%36,183	+%27,806	+%28,526	-
Faz Akımı (A)	+%39,873	-%10,047	+%80,854	+%71,756	+%67,563	-
Moment Rıplılı	+%160,383	+%73,224	+%258,47	+%328,415	+%253,142	-
Çıkıntı Oranı (Ld/Lq)	-%5,92	-%32,8	+%62,88	+%56,8	+%55,84	-

Tablo 7’deki veriler dikkate alınarak her bir amaç fonksiyonu için, motor gövdesi, kapak, rulman ve tüm işçilik ihmal edilerek sadece stator sacı, rotor sacı, rotor mili ve stator bakır miktarları dikkate alınarak yaklaşık maliyet hesaplaması yapılmıştır. Hesaplamalarda stator ve rotor çelik malzeme fiyatı 1000 \$/ton (Arena Metal, 2023), stator bakır malzeme fiyatı 8395 \$/ton (Erikoğlu

Emaya A.Ş., 2023), rotor mili malzeme fiyatı 33,52 TL/kg (Takım Metal, 2023) ve günlük dolar kuru 18,77 TL/\$ (TCMB, 2023) olarak alınmıştır. Rmxprt'te yapılan hesaplamalar sonucunda yaklaşık maliyet TL cinsinden ve hesaplanan malzeme ağırlıkları kg cinsinden Tablo 10'de verilmiştir.

Tablo 10. Tablo 7'teki verilerin Rmxprt'teki çözüm sonuçları

	Çıkış Gücü (W)	Verim	Moment (Nm)	Faz Akımı (A)	Stator Bakır Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Stator Çelik Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Rotor Çelik Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Rotor Mili Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Gövde ve İşçilik Hariç Yaklaşık Maliyet (TL)
AMAÇ FONSIYONU 3	4008,48	0,90	25,51	8,58	2,015	11,9551	4,48	1,951	691,38
AMAÇ FONSIYONU 4	4000,77	0,90	25,46	8,48	2,015	11,9551	4,53	1,951	692,32
AMAÇ FONSIYONU 5	4006,9	0,90	25,50	8,58	2,015	11,9551	4,40	1,951	689,88
REFERANS MOTOR- 4 Bariyer	4009,3	0,89	25,52	9,14	2,015	11,9551	4,78	1,951	697,01

Tablo 10 incelendiğinde oldukça yakın çıkış gücüne karşılık en iyi sonuç A.F.3 ile elde edildiği söylenebilir. Özellikle 0,5 A daha düşük akım çekmesine karşılık verim açısından küçük artış sergilemiştir. Bu artış daha kaliteli silisli saclar seçilerek daha iyi performans (Balcı ve Akkaya, 2022; Tarımer, Arslan ve Güven, 2012), ayrıca toplam yaklaşık maliyet dikkate alındığında A.F.3; 5,63 TL kazanç sağlaması beklenmektedir. Motorun yıllar boyunca sürecek seri imalatı düşünüldüğünde bu değer oldukça önemlidir.

SONUÇ

Motorun stator verileri sabit tutularak motorun yaklaşık maliyeti dikkate alınmaksızın motor performans parametrelerini içeren amaç fonksiyonları TYM ile rotor bariyer sayıları dikkate alınarak sınanmıştır. En uygun rotor verilerine göre elde edilen motor performans verileri incelenmiş ve referans motor ile karşılaştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Tepki yüzey metodu kullanılarak amaç fonksiyonlarına göre giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki ilişki incelenerek uygun değişkenler belirlenebilir.
- Farklı motor tasarımları için ele alınan beş amaç fonksiyonu dikkate alınarak optimizasyon gerçekleştirilebilir.
- Farklı optimizasyon teknikleri gibi tepki yüzey metodu kullanılarak optimizasyon gerçekleştirilebilir.

KAYNAKÇA

- ABB, (2022). <https://new.abb.com/news/detail/58874/abb-ie5-synrm-motors-deliver-ultra-premium-energy-efficiency>, Son Erişim Tarihi: 6 Aralık 2022.
- ABB,(2022)..<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AU-A000120962&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch>, Son Erişim Tarihi: 6 Aralık 2022.
- Arena Metal, 2023. <http://www.arenametal.com.tr/>, Son Erişim Tarihi: 3 Ocak 2023.
- Arslan, S. (2016). Dalgıç Motorun Analitik, Sayısal, Performans Sonuçlarının Karşılaştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 403-415.
- Arslan, S. (2017). *Tüp Biçimli Doğrusal Jeneratör Tasarımı ve Uygulaması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Arslan, S., Gürdal, O., & Akkaya Oy, S. (2020). Design and optimization of tubular linear permanent-magnet generator with performance improvement using response surface methodology and multi-objective genetic algorithm. *Scientia Iranica*, 27(6), 3053-3065.
- Aydar, A. Y. (2018). Utilization of response surface methodology in optimization of extraction of plant materials. *Statistical approaches with emphasis on design of experiments applied to chemical processes*, 157-169.
- Balci, S., & Akkaya, M. (2022). Reduction of the core size and power losses by using soft magnetic material for a single-phase induction motor. *Measurement*, 198, 111421.
- Ban, B., & Stipetic, S. (2022). Systematic Metamodel-based Optimization Study of Synchronous Reluctance Machine Rotor Barrier Topologies. *Machines*, 10(8), 712.
- Bedetti, N., Calligaro, S., & Petrella, R. (2016). Stand-still self-identification of flux characteristics for synchronous reluctance machines using novel saturation approximating function and multiple linear regression. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(4), 3083-3092.
- Boztaş, G. (2019). *Düşük Gerilim ile Beslenen Senkron Relüktans Motor ve Sürücü Tasarımı*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Çamcı, H., Mengi, O. Ö., & Arslan, S. (2022). Çok Amaçlı Genetik Algoritma Yöntemi Kullanılarak Enine Laminasyonlu Senkron Relüktans Motor Optimizasyonu. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 841-852.
- Erikoğlu Emaye, (2023). <https://www.erikogluemaye.com.tr/index.html>, Son Erişim Tarihi: 3 Ocak 2023.
- Ersöz, M., Öner, Y., & Bingöl, O. (2016). Akı bariyerli TLA tipi senkron relüktans motor tasarımı ve optimizasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(4), 941-950.
- Haataja, J. (2003). A comparative performance study of four-pole induction motors

and synchronous reluctance motors in variable speed drives, Doctoral dissertation, Lappeenranta University of Technology, Digipaino.

- Heidari, H., Rassõlkin, A., Kallaste, A., Vaimann, T., Andriushchenko, E., Belahcen, A., & Lukichev, D. V. (2021). A review of synchronous reluctance motor-drive advancements. *Sustainability*, 13(2), 729.
- Ibrahim, M. N. F., Abdel-Khalik, A. S., Rashad, E. M., & Sergeant, P. (2017). An improved torque density synchronous reluctance machine with a combined star–delta winding layout. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(3), 1015-1024.
- Lange, T., Kerdsup, B., Weiss, C., & De Doncker, R. W. (2014). Torque ripple reduction in reluctance synchronous machines using an asymmetric rotor structure. *IET Conference Publications*, 2014(628 CP).
- Mohanarajah, T., Rizk, J., Nagrial, M., & Hellany, A. (2018). Finite element analysis and design methodology for high-efficiency synchronous reluctance motors. *Electric Power Components and Systems*, 46(13), 1478-1493.
- Murataliyev, M., Degano, M., Di Nardo, M., Prystupa, D., Wang, S., Buticchi, G., ... & Galea, M. (2020). A homothetic scaling criteria for synchronous reluctance machines design. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(1), 547-559.
- Özdil, A. & Uzun, Y. (2021). Design and Analysis of a Rotor for a 22 kW Transversally Laminated Anisotropic Synchronous Reluctance Motor. *Elektronika ir Elektro-technika*, 27(6), 17–24.
- Salah, A., Elnour, M. M., & Elnail, K. E. I. (2020). Investigation of influence the slot/pole combinations on the torque performance for synchronous reluctance machine with distributed and concentrated windings. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1601, No. 2, p. 022040). IOP Publishing.
- Solak, B., & Öner, Y. (2020). Design and Optimization of Transmitter Laminated Synchronous Reluctance Motor. In 2020 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) (pp. 212-220). IEEE.
- Solak, B. (2021). *Senkron Relüktans Motorda Moment Dalgalanmasının Azaltılması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Takım Metal, (2023). <https://www.takimmetal.com/urunler/c45-karbon-celigi>, Son Erişim Tarihi: 3 Ocak 2023.
- Tarimer, İ., Arslan, S., & Güven, M. E. (2012). Investigation for losses of M19 and amorphous core materials asynchronous motor by finite elements methods. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 18(9), 15-18.
- Tawfiq, K. B., Ibrahim, M. N., El-Kholy, E. E., & Sergeant, P. (2021). Performance improvement of synchronous reluctance machines—A review research. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(10), 1-11.
- TCMB, (2023). <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/tcmb+tr/main+page+site+area/bugun>, Son Erişim Tarihi: 3 Ocak 2023.
- Topaloglu, I., Mamur, H., Korkmaz, F., & Cakir, M. F. (2014). Design and optimizati-

- on of surface mounted line start permanent magnet synchronous motor using electromagnetic design tool. In *2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)* (pp. 87-90). IEEE.
- Vagati, A., Franceschini, G., Marongiu, I., & Troglia, G. P. (1992). Design criteria of high performance synchronous reluctance motors. In *Conference record of the 1992 IEEE industry applications society annual meeting* (pp. 66-73). IEEE.
- Wang, K., Zhu, Z. Q., Ombach, G., Koch, M., Zhang, S., & Xu, J. (2015). Torque ripple reduction of synchronous reluctance machines: using asymmetric flux-barrier. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 34(1), 18–31.
- Yamamoto, Y., Morimoto, S., Sanada, M., & Inoue, Y. (2018). Torque ripple reduction using asymmetric flux barriers in synchronous reluctance motor. In *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia)* (pp. 3197-3202). IEEE.

Bölüm 10

ENZİMLER VE MİKROBİYEL ENZİM ÜRETİMİ

Seval ANDIÇ¹
Ayhan BAŞTÜRK²



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

2 Doç. Dr., Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği
Bölümü Van-Türkiye, e-posta: ayhanbasturk@yyu.edu.tr (ORCID ID:)

Giriş

Enzimler, kimyasal reaksiyonları katalizleme yeteneğine sahip, kovalanet peptit bağlarıyla bağlı amino asitlerden oluşan, özel protein yapılarıdır. Enzimler, spesifik genlerin ekspresyonuna (translasyonuna) dayalı olarak canlı organizmalar tarafından *in vivo* olarak sentezlenirler (Kirby, 1996; Lilley, 2005). Bazı enzimler sentezlendiklerinde inaktif durumdadırlar. Sentezlendiklerinde inaktif olan bu enzimlere öncül enzimler veya proenzimler denir. Bu enzimlerin aktif hale geçebilmeleri yapılarındaki bir veya birkaç peptit bağının, yine enzimler tarafından parçalanmasına bağlıdır. Böylelikle enzimlerin bloke durumda olan aktif bölgeleri açığa çıkar ve substratları ile etkileşebilirler (Khan ve James, 1988). Ancak tüm biyokimyasal katalizörler enzim değildir. Çünkü ribozim adı verilen bazı RNA molekülleri de reaksiyonları katalize eder. Ribozimler, ribonükleik asitlerden oluşan ve aynı veya farklı ribonükleik asit (RNA) ve deoksiribonükleik asit (DNA)'lerdeki fosfodiester bağlarının hidroliz reaksiyonlarını katalizleyen yapılarıdır. Ancak bu katalizleme oldukça yavaştır ve dakikada bir veya iki bağ hidrolize edilir (Lilley, 2005).

Ayrıca, sinzim adı verilen ve herhangi bir enzimin DNA dizisi kullanılarak laboratuvar ortamında oluşturulan, sentetik organik moleküller de (yapay enzimler) enzim benzeri katalitik aktivite sergilerler (Bjerre ve ark., 2008; Groves, 1997; Motherwell ve ark., 2001). Yapay enzimler, doğal enzimlerin üretimi ve saflaştırılmasının yüksek maliyetli olması, düşük termal kararlılık, zayıf substrat çeşitliliği ve farklı reaksiyon koşullarına düşük tolerans gibi dezavantajları göz önüne alınarak geliştirilmektedir (Yin ve ark., 2012). Sinzimler doğal enzim muadillerine benzer katalitik aktivitelere sahip olmanın yanı sıra, ayarlanabilir yapı ve katalitik verimleri, deneysel koşullara mükemmel toleransları, ekonomik olmaları gibi avantajlara sahiptir (D'Souza, 2003). Özellikle deterjan, kauçuk, kağıt, nişasta endüstrilerinde, biyokirlenme önleyici sistemlerin geliştirilmesinde, farmasötiklerin ve temiz yakıtların üretiminde önemli bir potansiyele sahiptirler (Kuah ve ark., 2016). Enzim taklitleri: polimerik ve dendrimerik enzim taklitleri, supramoleküler enzim taklitleri, nanopartikül enzim taklitleri ve protein yapılı (protein ve antikor) enzim taklitleri olarak 4 grup altında sınıflandırılabilir (Liu ve ark., 2004; Raynal ve ark., 2005; Korschelt ve ark., 2018).

Tamamen veya büyük oranda aminoasitlerden oluşan enzimler, proteinlerin kimyasal ve fiziksel bütün özelliklerine sahiptirler. Örneğin yüksek sıcaklık, yüksek konsantrasyonda asit veya baz varlığında denatüre olarak aktivite kaybederler. Çoğu enzim hidrofilik gruplarla kuşatılmış hidrofobik çekirdekten oluşmuş üç boyutlu protein yapısındadır. Bu durum çekirdekte hidrofobik etkileşimlerle reaksiyonların meydana gelmesine izin verirken, dış katmanda bulunan ve polar gruplar içeren hidrofilik kısım ise enzimin sulu sistemlerde stabilitesini sağlar (Yang ve ark., 2023).

Enzimler organizmalarda, çeşitli reaksiyonları katalizlemeleri amacıyla hücrelerde salgılanırlar. Salgılandıkları hücre içinde (intraselülüler) aktivite gösterebildikleri gibi, bir kısmı da hücre dışına (ekstraselülüler) salınarak orada aktivite gösterir. İntraselülüler enzimler hücre metabolizmasında rol alırlar. Ekstraselülüler enzimler hücre içinde üretildikten sonra, hücre dışında bulunan ve hücreye giremeyecek kadar büyük olan besinlerin parçalanmasında rol alırlar için hücre dışına salgılanırlar. Ekstraselülüler enzimler aynı zamanda parçalanma ürünlerinin substrat olarak kullanıldığı sentez reaksiyonlarında da rol alabilirler (Christy ve ark., 2014). Her iki grup enzim, çeşitli tekniklerle saflaştırıldıktan sonra, asıl aktivite gösterdikleri yer dışında da kullanılabilirler. Örneğin süt emen buzağı gibi hayvan yavrularının şirdenlerinden elde edilen kimozin, pepsin gibi enzimler peynir üretiminde kullanılır. Yada mikroorganizmalar tarafından üretilen enzimler saflaştırıldıktan sonra çeşitli alanlarda kullanılabilir.

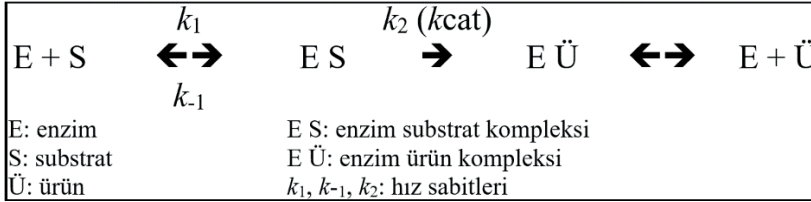
Enzimler polimerleri hidrolize uğrattıkları bölgeler açısından da endo-enzimler ve ekzo-enzimler olmak üzere ikiye ayrılır. Endo-enzimler (örneğin α -amilaz) polimerleri molekül içi rastgele bölgelerden, ekzo-enzimler ise (örneğin β -amilaz) molekülü uç kısımlardan hidrolize uğrattırır (Fujii ve Shimizu, 1985; Whitaker, 1996).

Farklı kaynaklardan (hayvansal, bitkisel ve mikrobiyel) elde edilen aynı enzimlerin, aktivite gösterdikleri pH ve sıcaklık aralıkları ile optimum pH ve sıcaklıklar ve reaksiyon hızları birbirinden farklı olabilir. Örneğin bakteri kaynaklı α -amilazın aktivite gösterdiği sıcaklık aralığı 65-95 °C iken küf kaynaklı α -amilazın aktivite gösterdiği sıcaklık aralığı 45-60 °C'dir. Farklı kaynaklardan elde edilen bir enzimin kantitatif ve aktivite farklılıklarının yanında, tek bir organizmanın kantitatif olarak aynı etkiye sahip, ancak amino asit dizilerindeki farklılıklar nedeniyle kantitatif, aktivite ve yapı bakımından farklılık gösteren enzimleri de mevcuttur ve bu enzimler izozimler olarak adlandırılırlar.

Enzimler de diğer katalizörler gibi reaksiyonların aktivasyon enerjisini düşürerek ve reaksiyondan bozulmadan çıkarak aktivite gösterir. Bu özellikleri ile reaksiyonların çok daha düşük enerjiyle ve çok daha kısa sürelerde gerçekleşmesini sağlarlar. Enzimler, kimyasal reaksiyonları katalizlenmemiş reaksiyonlara göre 10^{10} - 10^{15} kat daha yüksek verimlilik ve seçicilikle hızlandırabilir (Kirby, 1996). Ancak enzimlerin asıl özelliği, katalizörlüğü canlı sistemlerde yapabilmeleridir. Biyolojik sistemlerde yüksek enerji ve süre gerektiren reaksiyonlar, enzimler sayesinde, düşük sıcaklıklarda ve sürelerde gerçekleşebilir. Örneğin kimyasal olarak proteinlerin parçalanması için, yüksek sıcaklığa, uzun süreye ve yanında asit ve bazlara ihtiyaç duyulurken, protein parçalanmasını katalizleyen enzimlerin varlığında bu olay, vücut sıcaklığında ve kısa sürede gerçekleşebilir. Enzimler aynı zamanda reaksiyonların yönünü de belirler. Bütün yaşayan hücrelerde fiziksel ve kimyasal değişimlerin

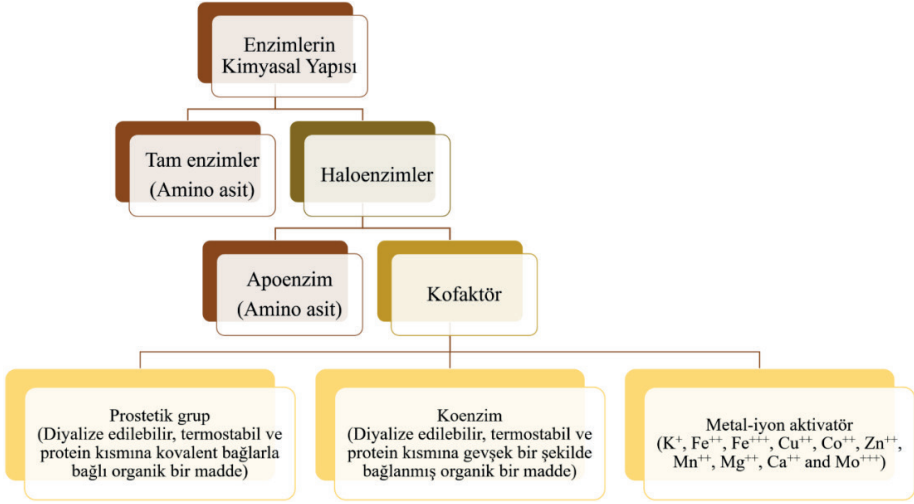
meydana geldiği metabolizma süreçleri gerçekleşmektedir. Bu metabolizma süreçlerinin neredeyse tamamının gerçekleşebilmesi enzimlerin katalizörlüğünü gerektirmektedir. Enzimler tarafından katalize edilen 5000'den fazla biyolojik süreç mevcuttur (Bairoch, 2000; Kuah ve ark., 2016; Thapa ve ark., 2019). Dolayısı ile biyolojik yaşamın devamlılığı enzimlerin varlığına bağlıdır.

Enzimatik reaksiyonların hızlarının ölçülmesi ve değişen koşulların reaksiyon üzerindeki etkilerinin araştırılması enzim kinetiği aracılığı ile yapılır ve ilk kez 1913 yılında Michaelis-Menten tarafından açıklanmıştır. Michaelis-Menten kinetiğinde, enzim katalizli reaksiyonlar için aşağıda verilen eşitlik geliştirilmiştir. Aslında enzim reaksiyonları çok daha karmaşıktır. Ancak bu denklem enzimler tarafından katalize edilen reaksiyonları çok iyi açıklar (Kirby, 1996).



Enzimlerin Kimyasal Yapısı

Enzimlerin bazıları bütünüyle amino asitlerden (tam enzim) oluşmasına rağmen bir kısmının (haloenzim) yapısında ise amino asitlerin (apoenzim) yanı sıra, protein kısma sıkı yada gevşek bağlarla bağlanmış, kofaktör adı verilen gruplar bulunmaktadır. Bu gruplar, biyokimyasal dönüşümlerin gerçekleşmesinde enzimlere yardımcı olan moleküllerdir. Biyolojik sistemlerde kofaktörler hayati öneme sahiptir. Çünkü haloenzimlerin katalitik aktiviteleri kofaktörlerine bağlı olarak gerçekleşir. Kofaktörler, prostetik grup, koenzim veya metal-iyon aktivatörler olabilirler (Şekil 1). Prostetik gruplar, enzim yapısına kovalent bağlarla sıkı bir şekilde bağlıdır. Reaksiyon başında ve sonunda enzimin yapısında bulunur ve yapıdan ayrılmazlar. Prostetik grupların yapıdan ayrılması, enzimin inaktive olmasına neden olur. Koenzimler, enzim yapısına nonkovalent bağlarla, gevşek şekilde bağlanmış, genellikle organik moleküllerdir. Katalizleme sürecinde gevşek olarak enzim yapısına bağlanmakta, reaksiyon sonunda ise enzim yapısından ayrılırlar. Koenzimlerin enzim yapısından ayrılması enzim inaktivasyonuna neden olmaz. Ancak enzimin reaksiyonu katalizleyebilmesi için ortamda bu koenzimlerin bulunması gerekmektedir. Metal-iyon aktivatörler ise kofaktör olarak görev yapan katyon ve anyonlardır (Riordan, 1997). Birçok enzimin biyolojik işlevinde önemli rol üstlenen metal-iyon aktivatörler elektron vericileri veya alıcıları, Lewis asitleri veya yapısal düzenleyiciler olarak görev üstlenirler (Prejanò ve ark., 2020; Whitaker, 1996).



Şekil 1. Enzimlerin kimyasal yapısı

Enzim Spesifikliği

Enzimlerin reaksiyonlarda etkiledikleri madde veya maddelere substrat denir. Her enzim düşük yada yüksek düzeyde substrat spesifikliğine sahiptir ve bu durum enzimleri diğer katalizörlerden ayıran en önemli özelliklerden biridir. Kimyasal katalizörler benzer bir çok reaksiyonu katalizleyebilirler. Oysa ki enzimler belli ölçülerde substrat spesifikliği gösterirler. Buda farklı substratlarla çalışılırken farklı enzimlere ihtiyaç olduğu anlamına gelir. Enzimlerin substrat spesifikliği aynı değildir. Yüksek substrat spesifikliği gösteren enzimler sadece tek bir maddeyi substrat olarak algılamakten, bazı enzimler düşük substrat spesifikliğine sahiptir ve örneğin aynı kimyasal grubu yada bağı bulunduran her maddeyi substrat olarak tanıyabilirler. Temelde 4 tip enzim spesifikliği vardır (Şekil 2) (Jackson ve ark., 2010; Whitaker, 1996; Whitehurst ve van Oort, 2010).

Mutlak spesifikklik	<ul style="list-style-type: none"> Bu grupta bulunan enzimler sadece tek bir reaksiyonu katalizlerler ve tek bir substrata spesifikk olarak çalışırlar.
Grup spesifikkliği	<ul style="list-style-type: none"> Bu grupta bulunan enzimler substrata değil, substrat üzerindeki gruplara spesifikklik gösterirler. Dolayısı ile belli bir grubu taşıyan her maddeyi substrat olarak kabul ederler.
Bağ spesifikkliği	<ul style="list-style-type: none"> Bu grupta bulunan enzimler, substrata değil, substrat üzerindeki belirli bir kimyasal bağa spesifikklik gösterirler. Dolayısı ile moleküler yapının geri kalanından bağımsız olarak, belirli nitelikteki kimyasal bağlar üzerinde etki gösterirler.
Stereokimyasal spesifikklik	<ul style="list-style-type: none"> Bu grupta bulunan enzimler maddenin sadece belirli bir optik veya stereooizomerini substrat olarak kabul ederler.

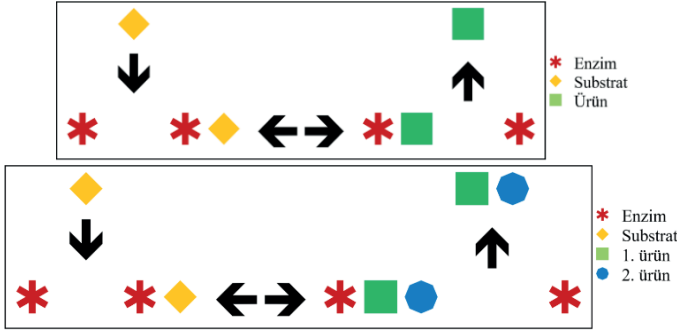
Şekil 2. Enzimlerde spesifikklik çeşitleri

Enzim Substrat İlişkisi

Enzimler globular protein yapısına sahiptirler ve genellikle yapılarında 60-2500 amino asit içerirler. Bu amino asitlerin çok az bir kısmı bağlanma ve katalitik aktiviteden, geri kalanlar ise enzimin üç boyutlu yapısının oluşumu ve korunmasından sorumludur. Bağlanma ve katalitik aktiviteden sorumlu amino asitler enzimin aktif merkezinde bulunurlar. Aktif merkez enzimin substrata bağlandığı bölgedir ve bir enzim üzerinde birden fazla aktif merkez bulunabilir. Tam enzimlerde, aktif merkezde bulunan amino asitlerin bir kısmı substratla bağlanmadan, bir kısmı ise katalitik aktiviteden sorumludur. Haloenzimlerde ise aktif bölgede bulunan amino asitler substrat bağlanmasını, kofaktörler ise katalitik aktiviteyi yerine getirirler. Aktif bölge substrat ile bağlanarak, substrattan ürün/ürünlere geçiş döneminde aktivasyon ve geçiş dönemi enerjilerinin azalmasına neden olur (Frey ve Hegeman, 2007).

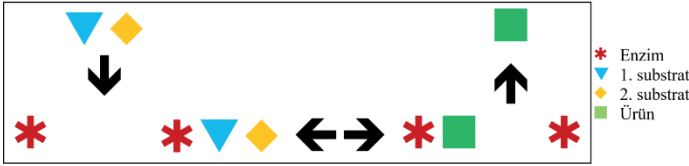
Enzimlerin aktif merkezi için Emil Fischer 1894 yılında anahtar-kilit modelini önermiş ve enzimlerin sabit değişmez bir yapıya sahip olduğunu ileri sürmüştür. Emil Fisher'e göre enzim spesifikkliği, hem enzimin hem de substratın birbirine uyumlu şekillerinden kaynaklanmaktadır. Bu görüş 1959'a kadar değişmeden kabul görmüştür. 1959'da Koshland uyarılmış-uyum modelini önermiştir. Bu modele göre ise enzimlerin aktif merkezi sabit bir yapıda değildir ve bağlanma esnasında esneklik göstererek, substratın şeklini alır. Her ne kadar anahtar-kilit modeli enzim substrat ilişkisini açıklamada çok önemli olsada, bu konuda yapılan çalışamalar, enzim substrat ilişkisini açıklamada uyarılmış-uyum modelinin, anahtar-kilit modelinden daha uygun olduğunu ortaya koymuştur (Gouin, 2014; Whitaker, 1996).

Enzimlerin tek bir substratı olabildiği gibi çoğunlukla iki substratlı reaksiyonları katalizlerler. Tek substratlı reaksiyonlarda bir veya iki ürün oluşabilir (Şekil 3).



Şekil 3. Tek substratlı reaksiyonlarda ürün/ürünler oluşumu

Enzimler tarafından katalizlenen tek substratlı reaksiyonlarda iki ürün meydana gelebildiği gibi iki substratlı reaksiyonlarda da tek bir ürün meydana gelebilir (Şekil 4).



Şekil 4. İki substratlı reaksiyonlarda ürün oluşumu

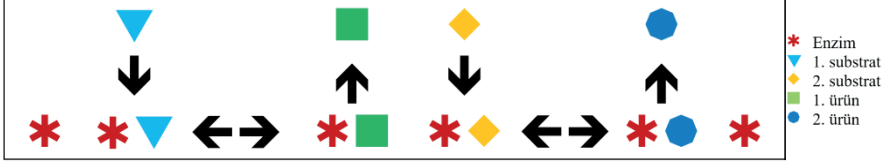
İki substratlı reaksiyonlarda iki ürün de meydana gelebilir. İki substrattan iki ürünün meydana geldiği reaksiyonlarda, substratlar enzime farklı mekanizmalar ile bağlanırlar. Bu mekanizmalar aşağıdaki gibidir (Cook ve Cleland, 2007; Rohwer ve ark., 2006).

Sıralı bağlanma mekanizması: Bu mekanizmada birinci ve ikinci substratlar, enzime belli bir sırayla bağlanır ve enzim + substratlar kompleksi oluşur. Katalizlenen reaksiyonda ürünler meydana gelir ve meydana gelen ürünler reaksiyondan belli bir sırayla çıkarlar. Ürünlerin meydana gelebilmesi için her iki substratın da aynı anda enzime bağlanması gereklidir (Şekil 5).



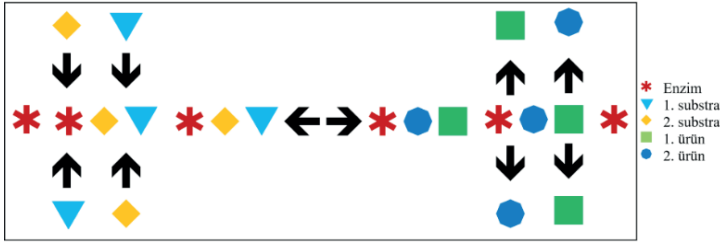
Şekil 5. Sıralı bağlanma mekanizması

Ping pong mekanizması: Bu mekanizmada substratlar enzime aynı anda bağlanmaz. Substratların enzime bağlanması ve ürünlerin oluşması ardışık olarak düzenli bir sıra ile gerçekleşir. Ürünlerin meydana gelebilmesi için iki substratın aynı anda enzime bağlanması gerekmez (Şekil 6).



Şekil 6. Ping pong mekanizması

Rastgele (düzensiz) bağlanma mekanizması: Bu mekanizmada substratların enzime bağlanması ve oluşan ürünlerin açığa çıkması belli bir sırayla değil düzensiz bir sıralamayla gerçekleşir. Ancak ürünlerin meydana gelebilmesi için her iki substratın da enzime aynı anda bağlanması gereklidir (Şekil 7).



Şekil 7. Rastgele bağlanma mekanizması

Enzimlerin Etki Mekanizmaları

Enzimler biyolojik katalizörlerdir ve diğer katalizörlerin yaptığı gibi reaksiyon hızını arttırmırlar. Aynı zamanda reaksiyonların gerçekleşmesi ve devamlılığı için gereken enerjinin de düşmesine neden olurlar. Bu aktiviteleri özellikle biyolojik sistemler için çok önemlidir. Bu mekanizma çeşitli şekillerde gerçekleşir (Frey ve Hegeman, 2007; Whitehurst ve van Oort, 2010).

1. Enzimler substratları ile bağlanarak, substrattan ürüne geçişte oluşabilecek konformasyonel değişimleri stabilize ederler ve böylece aktivasyon enerjisini düşürürler.

2. Enzimler substrat yapısında herhangi bir bozulmaya neden olmadan, geçiş durumundakine göre zıt yük dağılımına sahip bir ortam yaratarak, geçiş durumu enerjisini düşürürler.

3. Sadece enzimlerin varlığında gerçekleşebilecek, geçici enzim substrat bağlanmaları ile reaksiyon için alternatif bir yol sağlarlar.

4. Birden fazla substratın katalizlendiği reaksiyonlarda, substratları doğru şekilde bir araya getirerek, entropi değişimlerini azaltırlar. Bu reaksiyonlarda substratlar enzimler tarafından bağlandıkları için, rastgele bir araya gelinceye kadar harcanan enerjiyi harcamak zorunda kalmazlar. Ayrıca substratlar enzim tarafından bir arada tutulduğu için, moleküller arası itme kuvvetlerinin üstesinden gelmek için enerji harcamak zorunda kalmazlar.

Enzim Aktivitesine Etki Eden Faktörler

Enzimlerin aktivitesi enzim kaynaklı ve enzim kaynaklı olmayan pek çok faktör tarafından etkilenir (Şekil 8-9). Enzimler protein yapıda olduklarından dolayı, proteinler üzerinde etkili olan her faktör enzim aktivitesini de etkiler. Örneğin proteinlerin denatüre olmasına neden olan yüksek sıcaklık, enzimlerin de denatüre olarak aktivite kaybetmesine neden olur.

Enzim miktarı	<ul style="list-style-type: none"> Bir reaksiyonda sıcaklık, pH gibi faktörler sabit tutulduğunda ve substrat konsantrasyonu çok yüksek olduğunda, enzim konsantrasyonunun reaksiyon hızı üzerindeki etkisi doğrusal bir şekilde artış gösterir. Ancak substrat konsantrasyonu sınırlandığında enzim aktivitesi de buna bağlı olarak sınırlanacaktır. En yüksek enzim aktivitesi genellikle sınırsız substrat konsantrasyonlarında ölçülür.
Allosteri	<ul style="list-style-type: none"> Allosteri protein molekülünün allosterik bölgesine bir efektör molekülünün bağlanmasıdır. Bunun sonucunda protein molekülü yeniden düzenlenir. Enzimlerde allosterik bölgeler, aktif bölgenin dışında bir bölgededir. Enzimin aktivitesini artıran efektörlere allosterik aktivatörler, azaltanlara ise allosterik inhibitörler denir. Allosterik inhibitörler rebataçı olmayan inhibisyon yaparlar ve enzim substratına bağlanamaz.
Kofaktörler	<ul style="list-style-type: none"> Pek çok enzim, katalitik aktivitesini göstermek için gerekli olan ve kofaktör adı verilen başka bileşiklerin varlığını gerektirir. Kofaktörler enzimin aktif bölgesine veya aktif bölgeye yakın bir yere kovalent veya nonkovalent bağlarla bağlıdır ve enzim aktivitesi bu maddelerin varlığına bağlıdır.
İnhibitörler	<ul style="list-style-type: none"> Enzim inhibitörleri, katalitik etkiyi yavaşlatarak veya durdurarak enzim aktivitesini etkileyen maddelerdir. Rekabetçi (fiziksel ve kimyasal yapı olarak substrata benzeyen maddelerin enzime bağlanarak aktif bölgeyi bloke etmesi), rekabetçi olmayan (inhibitörün aktif merkez dışında bir bölgeden enzim substrat kompleksine bağlanarak ürün oluşumunu engellemesi) ve substrat inhibisyonu (aşırı miktarda substrat mevcut olması) olmak üzere üç tip inhibisyon vardır.

Şekil 8. Enzim aktivitesini etkileyen, enzim kaynaklı faktörler

Substrat miktarı: Enzim konsantrasyonu ve diğer faktörlerin standart tutulduğu koşullarda, enzim hızı artan substrat miktarına bağlı olarak belli bir noktaya kadar artış gösterir. Bu noktadan sonra ortama daha fazla substrat ilavesi reaksiyon hızını arttırmaz. Reaksiyon hızı sabit kalarak devam eder.

Sıcaklık: Enzim hızı, enzim çeşidine bağlı olmak üzere, belli bir sıcaklık derecesine kadar artmakta ve denatürasyona bağlı olarak ani bir düşüş göstermektedir. Enzimler genellikle 50°C civarında optimum aktivite gösterirler.

pH: Her enzimin optimum aktivite gösterdiği pH aralığı farklıdır. Hemen tüm enzimlerin aktiviteleri, pH değişimlerinde maksimum bir seviyeye ulaştıktan sonra azalmaya başlar ve çan eğrisi şeklindedir. Bundan farklı olarak bazı enzimler optimum pH aralığının sağında veya solundaki bölgede ani aktivite kaybına uğurlar. Bazı enzimler ise pH değişimlerinden etkilenmezler.

Basınç: Gıda uygulamalarında enzimleri inaktive edecek düzeyde basınç oluşmaz. Ancak basınçla birlikte yüksek sıcaklık yada kayma güçleri, enzimlerin inaktivasyonuna neden olabilir. İnaktivasyona neden olacak basınç uygulamaları tek alt birimden oluşan enzimlerden çok, monomerlerin ayrışmasına neden olduğundan, birden fazla alt birimden oluşan enzimler üzerinde daha etkilidir.

İyonize radyasyon: Gıdalara uygulanan iyonize radyasyon enzimlerin inaktivasyonuna neden olabilir. Enzimleri etkisiz hale getirmek için gerekli iyonize radyasyon dozu mikroorganizma sporlarını inaktive etmek için gerekenin 10 kat daha fazlasıdır.

Çözücüler: Genel olarak, su ile karışmayan çözücüler, suyun yerini alarak enzimleri stabilize eder. Bununla birlikte, suyla karışabilen çözücüler, yaklaşık %5-10'u aşan konsantrasyonlarda, sıcaklığa bağlı olarak, genellikle enzimleri inaktive eder.

Ara yüzey: Proteinler ideal yüzey aktif moleküllerdir ve hava/su ve lipid/su sistemlerinde yüksek enerjili ara yüzeyde konumlanır. Ara yüzey alanlarındaki yüksek enerji enzimlerin denatüre olarak aktivite kaybetmesine neden olabilir.

Şekil 9. Enzim aktivitesini etkileyen, enzim kaynaklı olmayan faktörler

Enzimlerin Sınıflandırılması

Enzimler üzerindeki çalışmalar 19 yy'da Pasteur ile başlamış ve ilk saf enzim ise 1926'da Sumner tarafından izole edilmiştir. Bu tarihten günümüze binlerce enzim tanımlanmıştır. Enzimlerin saf olarak izole edildiği ilk dönemlerde sistematik bir isimlendirme kullanılmamıştır. Enzimler özel isimler verilerek (katalaz), substratları (peptidaz) veya katalizledikleri reaksiyonlar (oksidaz) baz alınarak gelişigüzel isimlendirilmiştir. Genellikle enzimlerin isimleri -az son ekine sahiptir. Ancak "pepsin" örneğinde olduğu gibi -az son ekini taşımayan enzim isimleri de mevcuttur. Başlangıçta az sayıda enzim için uygulanabilir olan bu isimlendirme şekli, zaman içinde çok fazla sayıda enzimin keşfi ile işlerliğini kaybetmiş ve sistematik bir isimlendirme ihtiyaç duyulmuştur. Uluslararası Biyokimya ve Moleküler Biyoloji Birliği (IUBMB) enzimleri 7 ana sınıfa ayırmıştır (McDonald ve ark., 2009) (Şekil 10).

Sistematik isimlendirmede enzimlerin isimi iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım enzimin etki ettiği substratı, ikinci kısım ise katalizlediği reaksiyon tipine göre dahil olduğu ana sınıfı göstermektedir. Ayrıca her enzimin, dahil olduğu ana, alt, alt alt gruplar ve seri numarasının bulunduğu bir EC numarası vardır. Enzimlerin dahil olduğu ana ve alt sınıflar aşağıda verilmiştir (Şekil 11) (McDonald ve ark., 2009).

1. Oksidoredüktazlar

- Elektron transferi olan yükseltgenme-indirgenme reaksiyonlarını katalizleyen tüm enzimleri içerir. Yükseltgenen substrat hidrojen veya elektron donörü, indirgenen substrat ise hidrojen veya elektron vericisi olarak kabul edilir. Yaygın isimleri dehidrojenazlardır ancak alternatif olarak redüktazlarda kullanılır. Oksidaz ismi ise sadece oksijenin alıcı olduğu durumlarda kullanılır.

2. Transferazlar

- Metil, glikosil veya fosfat gibi bir grubu bir bileşikten diğer bir bileşiğe transfer eden enzimlerdir. Yaygın isimlendirilme "alıcı grup transferaz" veya "verici grup transferaz" şeklinde oluşturulur. Çoğunlukla verici, transfer edilecek grubu taşıyan bir koenzimdir.

3. Hidrolazlar

- Çeşitli bağların kırılmasını katalizleyen enzimlerdir. Sistematik isimlendirmede daima "hidolaz" kullanılır. Yaygın isimlendirmede ise çoğunlukla substrat sonuna -az eki getirilir.

4. Liyazlar

- C-C, C-O, C-N ve diğer bağları hidroliz veya oksidasyon dışındaki yollarla kıran enzimlerdir. Sistematik adı "substrat grubu-liyaz'a" göre oluşturulmuştur.

5. İzomerazlar

- Tek bir molekül içindeki değişiklikleri katalizleyen enzimlerdir.

6. Ligazlar

- İki molekülün veya bir molekülün iki parçasının birleşmesini katalizleyen enzimlerdir. Reaksiyon sırasında genellikle büyük moleküle ait küçük bir grup hidrolize olarak yapıdan ayrılır.

7. Translokazlar

- İyonların veya moleküllerin zarlar boyunca hareketini veya bunların zarlar içinde ayrılmasını katalize eden enzimlerdir.

Şekil 10. Enzimlerin dahil olduğu ana sınıflar

Ana Sınıflar	Alt Sınıflar
EC 1 Oksidoreduktazlar	<p>CH-OH donör grubu üzerinde çalışan enzimler Aldehit veya okso donör grubu üzerinde çalışan enzimler CH-CH donör grubu üzerinde çalışan enzimler CH-NH₂ donör grubu üzerinde çalışan enzimler CH-NH donör grubu üzerinde çalışan enzimler NADH veya NADPH üzerinde çalışan enzimler Donör olarak diğer nitrojen bileşikleri üzerinde çalışan enzimler Bir kükürt donör grubu üzerinde çalışan enzimler Bir heme donör grubu üzerinde çalışan enzimler Donör olarak difenoller ve ilgili maddeler üzerinde çalışan enzimler Alıcı olarak bir peroksit üzerinde çalışan enzimler Verici olarak hidrojen üzerinde çalışan enzimler Moleküller oksijen dahil edilerek tek donörler üzerinde çalışan enzimler Moleküller oksijenin dahil edilmesi veya azaltılması ile eşleştirilmiş donörler üzerinde çalışan enzimler Alıcı olarak süperoksit üzerinde çalışan enzimler Metal iyon oksitleyicileri CH veya CH₂ gruplarında çalışan enzimler Donör olarak demir-kükürt proteinleri üzerinde çalışan enzimler Donör olarak azaltılmış flavodoksin üzerinde çalışan enzimler Donörlerde fosfor veya arsenik üzerinde çalışan enzimler X-H + Y-H = X-Y reaksiyonunu katalize eden enzimler Donörlerde halojen üzerinde çalışan enzimler Alıcı olarak C-O-C grubunun indirgenmesini katalizleyen enzimler Diğer oksidoreduktazlar İndirgeyici olarak H₂ kullanan enzimler Yükseltiyici olarak O₂ kullanan diğer enzimler</p>
EC 2 Transferazlar	<p>Tek karbon gruplarını aktaran enzimler Aldehit veya keton gruplarını aktaran enzimler Açıltransferazlar Glikosiltransferazlar Metil grupları dışındaki alkil veya aril gruplarını aktaran enzimler Azot gruplarını aktaran enzimler Fosfor içeren grupları aktaran enzimler Sülfür içeren grupları aktaran enzimler Selenyum içeren grupları aktaran enzimler Molibden veya tungsten içeren grupları aktaran enzimler</p>
EC 3 Hidrolazlar	<p>Ester bağları üzerinde çalışan enzimler Glikosilazlar Eter bağları üzerinde çalışan enzimler Peptid bağları (peptidazlar) üzerinde çalışan enzimler Peptid bağları dışındaki karbon-azot bağları üzerinde çalışan enzimler Asit anhidritler üzerinde çalışan enzimler Karbon-karbon bağları üzerinde çalışan enzimler Halojenür bağları üzerinde çalışan enzimler Fosfor-azot bağları üzerinde çalışan enzimler Kükürt-azot bağları üzerinde çalışan enzimler Karbon-fosfor bağları üzerinde çalışan enzimler Kükürt-kükürt bağları üzerinde çalışan enzimler Karbon-kükürt bağları üzerinde çalışan enzimler</p>
EC 4 Liyazlar	<p>Karbon-karbon liyazlar Karbon-oksijen liyazlar Karbon nitrojen liyazlar Karbon-kükürt liyazları Karbon halojenür liyazlar Fosfor-oksijen liyazlar Karbon-fosfor liyazlar Nitrojen-oksijen liyazlar ATP'den bağımsız şelatlar Diğer liyazlar</p>
EC 5 İzomerazlar	<p>Rasemazlar ve epimerazlar Cis-trans-izomerazlar Molekül içi oksidoreduktazlar Molekül içi transferazlar Molekül içi liyazlar Makromoleküler konformasyon değiştiren izomerazlar Diğer izomerazlar</p>
EC 6 Ligazlar	<p>Karbon-oksijen bağları oluşturan enzimler Karbon-kükürt bağları oluşturan enzimler Karbon-azot bağları oluşturan enzimler Karbon-karbon bağları oluşturan enzimler Fosforik ester bağları oluşturan enzimler Azot-metal bağları oluşturan enzimler Azot-azot bağları oluşturan enzimler</p>
EC 7 Translokazlar	<p>Hidronların yer değiştirmesini katalize eden enzimler İnorganik katyonların yer değiştirmesini katalize eden enzimler İnorganik anyonların ve şelatlarının yer değiştirmesini katalize eden enzimler Amino asitlerin ve peptitlerin yer değiştirmesini katalize eden enzimler Karbonhidratların ve türevlerinin yer değiştirmesini katalize eden enzimler Diğer bileşiklerin yer değiştirmesini katalize eden enzimler</p>

Şekil 11. Enzimlerin ana ve alt sınıfları

Mikrobiyel Enzimler

Enzimler her canlı yapısında bulunmakta ve çok önemli işlevleri yerine getirmektedirler. Gıda enzimleri ise gıda kaynaklarının yapısındaki metabolik süreçlerin işleminde rol oynarlar. Gıdaların yapısında, kendi kaynaklarından taşıdıkları enzimlerin yanında başka kaynaklardan gelen enzimlerde bulunmaktadır. Bu enzimler çoğunlukla mikroorganizmalar tarafından sentezlenen enzimlerdir. Gıda enzimleri kontrolsüz koşullarda çalıştıklarında, istenen yönde değişimler gerçekleştirebildikleri gibi, istenmeyen bir takım değişimlerin de meydana gelmesine neden olabilirler. Örneğin enzimatik esmerleşme reaksiyonları, aşırı olgunlaşma, duyuusal ve yapısal bozukluklar vb.

Gıdaların üretilmesi, bazı özelliklerinin değiştirilmesi ve/veya geliştirilmesi gibi amaçlar için gıdanın yapısında bulunan enzimlerin dışında farklı kaynaklardan elde edilen enzimler de kullanılabilir. Enzim teknolojisindeki gelişmeler, enzimlerin buldukları kaynaklardan alınarak saflaştırılmalarını mümkün kılmıştır. Bu şekilde elde edilen enzimler tıp, eczacılık, çeşitli gıdaların üretimi, deterjan üretimi, hayvan yemi üretimi, alkollü ve alkolsüz içeceklerin üretimi, kağıt üretimi ve deri ve tekstil uygulamaları gibi bir çok alanda kullanılabilir (Godfrey ve West, 1996; Kirk ve ark., 2002). Enzimler birtakım sağlık bozukluklarının kantitatif olarak belirlenmesi amacıyla klinik teşhislerde ve bazı analitik yöntemlerde de kullanılmaktadır. Ayrıca genetik problemlerden kaynaklanan insan enzimlerinin eksikliğine bağlı sağlık bozukluklarının tedavisinde mikrobiyel enzimler kullanılmaktadır (Vellard, 2003). Nanotaşıyıcılarla hedeflendirilen etkin maddelerin, hedeflendirilmesinde enzimler de kullanılabilir ve bu işleme enzim aracılı hedeflendirilme denilmektedir. Hedeflendirme ile treapötik ajanlar sadece seçilen bölgelere yönlendirildiği için hem etkinlikleri artmakta, hem de yan etkileri azaltılmaktadır (Sayiner ve Çomoğlu, 2016; Shahriari ve ark., 2019). Analitik, teşhis ve tedavi amaçlı kullanılacak olan enzimler yüksek oranda saflaştırılarak, endüstriyel amaçlı kullanılacak olanlar ise kısmen saflaştırılarak hazırlanırlar. Ayrıca tıp ve gıda alanlarında GRAS olarak kabul edilen mikroorganizmaların enzimlerinin kullanılması tercih edilmektedir (Le Rose-Hill ve Prins, 2016).

Gıda uygulamalarında hayvansal, bitkisel veya mikroorganizma kaynaklı enzimler kullanılabilir. Ancak bitki ve hayvansal kaynaklardan enzim eldesi çok fazla hammadde gerektirdiği ve bu nedenle çok maliyetli olduğu için mikroorganizma kaynaklı enzimlerin kullanımı daha çok tercih edilmektedir (Thapa ve ark. 2019). Örneğin peynir yapımında kullanılan ve inek, koyun ve keçi gibi hayvanların süt emen yavrularının şirdenlerinden elde edilen rennet, bu amaç için çok fazla yavru hayvan kesilmesini gerektirmektedir. Oysaki bazı mikroorganizmalar hayvansal kaynaklı rennetelerin özelliklerine benzer özellikte rennet üretmektedir.

Ayrıca rekombinant DNA teknolojisi ve protein mühendisliğindeki gelişmelerle, artan enzim talebini karşılamak için mikroorganizmalara büyük miktarda enzim üretimi yaptırılmaktadır. Gen teknolojisi kullanılarak, hayvansal veya bitkisel kaynaklı enzimler mikroorganizmalara ürettirilmektedir. Bu teknolojide enzim üretiminden sorumlu hedef gen izole edilerek bir taşıyıcıya bağlanır ve başka bir organizmaya taşınır. Böylece enzim genin taşındığı organizma tarafından sentezlenir (Singh ve ark., 2016).

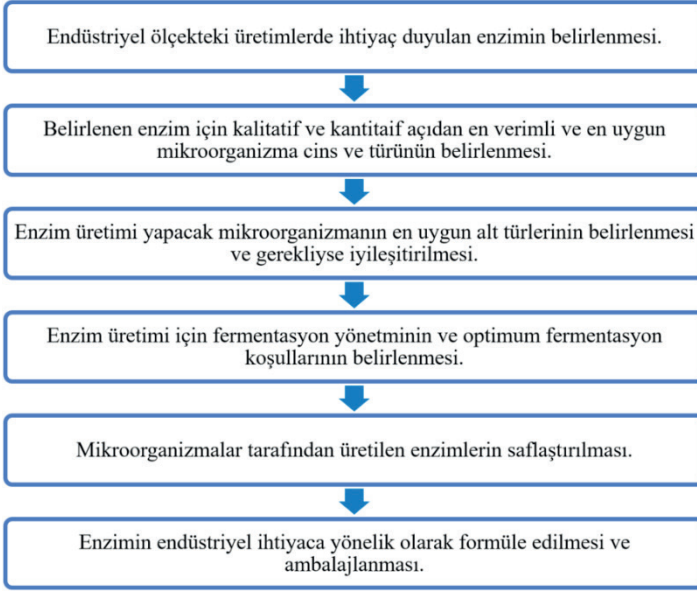
Gıda teknolojisinde yaygın olarak kullanılan mikrobiyel kaynaklı enzimlerin çok çeşitli avantajları vardır ve bu avantajlar aşağıda verilmiştir (Raveendran, 2018).

1. Hayvansal ve bitkisel kaynaklı enzimlere kıyasla daha ekonomiktirler.
2. Üretimleri daha kolaydır.
3. Standart üretim olanağına sahiptir.
4. Kısa sürede yüksek miktarda üretim olanağı vardır.

Mikrobiyel enzim üretiminde bakteri maya ve küfler kullanılabilir. Tüm mikroorganizmalarda da, diğer canlı hücrelerde olduğu gibi canlılığın devamlılığını sağlamak için çok çeşitli enzimler mevcuttur. Bu enzimler hidrolize edici, oksitleyici, indirgeyici ve metabolizma olaylarında rol alan enzimlerdir. Ancak mikroorganizma hücrelerinde bulunan bu enzimler, nitelik ve nicelik bakımından, her mikroorganizmanın alt türleri arasında bile farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle ticari enzim üretiminde en önemli basamak, üretilmesi istenen enzimi, nitelik ve nicelik açısından en yüksek düzeyde üretecek mikroorganizma alt türlerinin belirlenmesidir. (Singh ve ark., 2016; Thapa ve ark. 2019).

Mikrobiyel Enzim Üretimi

Endüstriyel kullanım amaçlı mikrobiyel enzimlerin üretimi belli aşamalarda (Şekil 12) ve bu konuda uzmanlaşmış üretici firmalar tarafından yapılmaktadır. Enzim üretici firmalar tarafından, öncelikle endüstride hangi enzime ihtiyaç olduğu saptanır. Daha sonra bu enzimi üretecek mikroorganizma ve bu mikroorganizmanın optimum fermentasyon koşulları belirlenir. Mikrobiyel enzim üretiminde, uygun suş, substrat ve işlem parametrelerinin seçimi, üretim sürecini önemli düzeyde etkileyen faktörleridir (Pandey ve ark., 2000). Ekstrasellüler enzim üretici suşlar, enzim saflaştırılması sırasında hücre parçalanması işlemine gerek duyulmayacağı için, intrasellüler enzim üretici olanlara tercih edilmelidir. Enzim üretimi için uygun suşların seçimi yanında, ayrıca gen manipülasyonları ile enzim üretici mikroorganizmaların büyük ölçekli üretim yapmaları sağlanabilir.



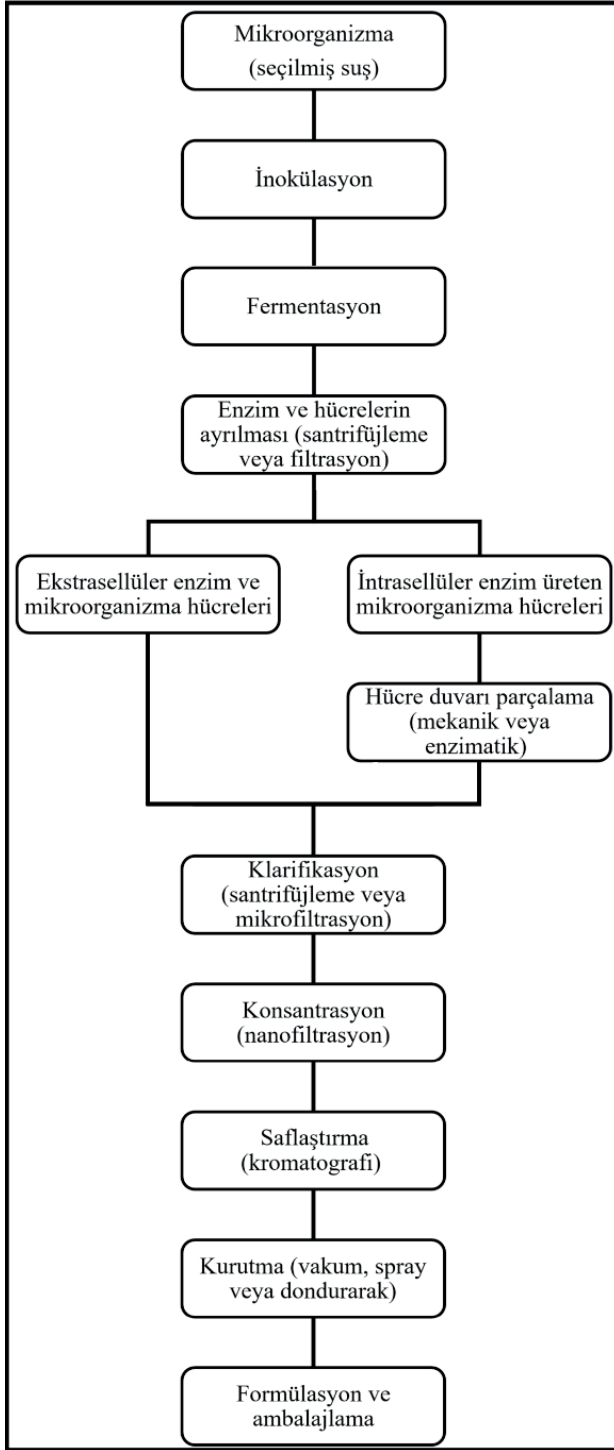
Şekil 12. Endüstriyel ölçekteki enzim üretiminde takip edilen basamaklar

Mikrobiyel enzim üretimi seçilen suşların, inokülasyonu ile başlar. Uygun koşullarda yapılan fermentasyon sonucunda, mikroorganizmalar tarafından üretilen enzimler çeşitli teknikler kullanılarak, enzim dışında kalan maddelerden ayrılır ve saflaştırılır. Ticari mikrobiyel enzim üretim basamakları Şekil 13'te verilmiştir. Mikrobiyel enzim üretiminde; katı ortamda gerçekleştirilen katı faz fermentasyon (KFF) ve sıvı ortamda gerçekleştirilen daldırmalı fermentasyon (derin kültür fermentasyonu) (DF) yöntemleri kullanılmaktadır.

Katı faz fermentasyon yöntemi, üretim ortamının düşük nem içeriğinden dolayı daha çok maya ve küf hücrelerinin üretiminde kullanılmaktadır. Özellikle küfler hifleri aracılığı ile katı substratın iç kısımlarına kadar ulaşarak, daha fazla miktarda besin maddesinden faydalanabilirler. Her ne kadar sistemin küf ve mayalar için uygun olduğu düşünülse de, son yıllarda *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus casei* ve *Lactobacillus helveticus* gibi bakteriler de, bu sistemde çeşitli ürünlerin elde edilmesi amacıyla çoğaltılmaktadır (Makkar ve Cameotra, 1999; Makkar ve Cameotra, 1997; Richter ve Trager, 1994; Xavier ve Lonsane, 1994).

Katı faz fermentasyon yönteminde substrat seçimi fermentasyonun başarısı üzerinde önemli etkisi olan faktörlerden birisidir. Mikroorganizmaların besin ihtiyaçlarını karşılayan meteryal, aynı zamanda mikroorganizmaların üzerinde ve/veya içerisinde gelişeceği destek materyalini de oluşturur (Singhania ve ark., 2009). Eğer bu materyal mikroorganizmaların ihtiyaç duy-

duğu besin elementlerinin bazılarını hiç ya da yeterli düzeyde içermiyorsa, gerekli besin maddeleri dışarıdan da ilave edilebilir. Katı faz fermentasyon yönteminde substrat olarak kullanılacak materyalin kolay bulunabilir olması da ekonomiklik açısından önemlidir. Bu nedenle uygun endüstri ve tarım atık ve/ veya artıkları bu amaçla kullanılabilir (Pandey ve ark., 2000). Mikroorganizmaların, substratın alt tabakalarında bulunan besin maddelerinden daha fazla faydalanabilmeleri için substrata ezme, parçalama, öğütme gibi bazı mekanik veya kimyasal ön işlemler uygulanabilir. Substrat parçacıklarının büyük olması iyi bir havalandırmaya izin vereceği için avantajlıdır. Ancak yüzey alanı küçük olduğundan mikroorganizmalar daha az besin maddesine erişebilirler. Çok küçük parçacık büyüklüğüne sahip substratlar ise agrege olarak havalandırmayı sınırlandırabilirler. Bu nedenlerle hem havalandırmayı engellemeyecek, hem de mikroorganizmaların daha fazla besin maddesine erişimini sağlayacak bir substrat parçacık büyüklüğü tercih edilmelidir (Krishna, 2005; Lonsane ve ark., 1985). Katı faz fermentasyon yönteminde önemli faktörlerden biri de substratın nem miktarı ve su aktivitesidir. Substrat, üzerinde geliştirilen mikroorganizmanın canlılığını destekleyecek oranda serbest su içermelidir (Ruijter ve ark., 2004; Lu ve ark., 2003). Katı faz fermentasyon yönteminin, substratın nem içeriğinin düşük olması, pH ve sıcaklık gibi koşulların kontrollerinin güç olması gibi dezavantajları vardır. Ancak, katı faz fermentasyon yönteminin, daldırmalı fermentasyon yöntemine göre; gelişim ortamı neminin düşük olması nedeniyle kontaminasyon riskinin düşük olması, oksijen sirkülasyonunun iyi olması, kullanılan substratın mikroorganizmanın ihtiyacı olan hemen tüm besin maddelerini içermesi, verimin ve ürün kararlılığının daha yüksek olması, tarım ve endüstri atık ve/veya atıklarının substrat olarak kullanılabilmesine olanak sağlaması gibi avantajları da mevcuttur.



Şekil 13. Ticari mikrobiyel enzim üretim basamakları

Ticari mikrobiyel enzim üretiminde kullanılan ikinci yöntem daldırma-lyal fermentasyon yöntemi (derin kültür fermentasyonu)'dir. Bu yöntemde fermentasyon sulu bir sistemde gerçekleştirilir. Sistem, büyüklüğü değişen biyoreaktörlerden (fermentör) oluşmaktadır. Bu sistemlerde biyolojik ve/veya biyokimyasal süreçler kontrollü koşullar altında gerçekleştirilir. Sıcaklık, pH, çözülmüş oksijen miktarı ve metabolizma ürünleri gibi, mikrororganizma gelişmesi üzerinde etkili parametreler kontrol altında tutulabilmektedir (de Souza Vandenberghve ve ark., 2016; Ouedraogo ve Tsang, 2021). Biyoreaktörlerde mikroorganizma ve/veya ürünlere bağlı olarak, aerobik ve anaerobik fermentasyonlar gerçekleştirilebilir. Antibiyotikler ve enzimler, oksijenin sıvı ortama dahil edilmesini içeren aerobik fermentasyon yoluyla üretilir. Bu nedenle enzim üreticisi mikroorganizmaların oksijen ihtiyacını karşılamak için sıvı içerisine sürekli oksijen verilir. Biyoreaktörlerde, kütle aktarımı pasif difüzyon ile de gerçekleştirilebilse de etkinliğinin yüksek olması nedeni ile perfüzyon tekniğı daha fazla tercih edilir. Perfüzyonla daha derinlerdeki hücrelere oksijen aktarımı mümkün olmaktadır. Ayrıca fermentörlere entegre edilen karıştırıcılar ile gaz, biyokütle ve asılı partiküllerin sıvı içerisinde homojen dağılması ve böylece yeterli düzeyde besin maddesi ve oksijenin mikroorganizmalara ulaşması sağlanır. Bu nedenlerle daldırma-lyal fermentasyon yönteminin, katı faz fermentasyon yöntemine göre daha avantajlı olduğu kabul edilmektedir (Patel ve ark., 2017)

Daldırma-lyal fermentasyon yöntemi kesikli, beslemeli kesikli, perfüzyon kesikli ve sürekli olmak üzere 4'e ayrılır:

Kesikli daldırma-lyal fermentasyon yöntemi: fermentörün hazırlanması, fermentasyon, fermentörün boşaltılması ve temizlenmesi aşamalarından oluşur. Biyoreaktöre, sıvı substrat konularak sterilize edilir. Daha sonra inoküle edilir ve hücre yoğunluğu istenen seviyeye ulaştıktan sonra, sıvı işlenmek üzere tamamen boşaltılır. Biyoreaktör yeni üretim için hazırlanır ve doldurulur. Her üretim birbirinden bağımsız olarak gerçekleştirilir. Üretim süresince substrat beslemesi ve ürün uzaklaştırılması yapılmaz. Sadece aerobik fermentasyonlar için hava beslemesi yapılır. Fermentasyon süresince substrat yoğunluğu azalırken, hücre yoğunluğu artar (Patel ve ark., 2017; Zhang ve Lynd, 2003).

Beslemeli kesikli daldırma-lyal fermentasyon yönteminde, substrat sterilize edildikten sonra inoküle edilir ve fermentasyon süresince fermentöre kademeli olarak konsantr haldeki substrattan eklenir. Ancak fermentörden herhangi bir ürün uzaklaştırılması yapılmaz. Sisteme kademeli olarak substrat eklendiğı için zamana bağlı olarak reaksiyon hacmi artar ve ürün verimi yüksektir. Beslemeli kesikli fermentasyon, besin sağlanmasını kontrol ederek substratla ilişkili büyüme inhibisyonunu önlemek veya azaltmak için kullanılır (Lee ve ark., 1999).

Perfüzyon kesikli daldırmalı fermantasyon yönteminde, bu yöntem için tasarlanmış biyoreaktörler kullanılır. Sistemde fermentasyon süresince kademeli olarak bir miktar substrat eklemesi yapılır ve hücresiz substrat geri çekilir. Geri çekilen substrat çelik veya seramik bir filtreden geçirilerek hücrelerden ayrılır ve filtrelerin tıkanmasını önlemek için fermentör sürekli döndürülür. Bu şekilde süzülen substrat ürün haznesine, taze substrat ise fermentöre pompalanır (Stanbury ve ark., 2017).

Sürekli daldırmalı fermantasyon yönteminde ise mikrobiyal çoğalmanın üstel fazında, ürün ve hücre içeren bir miktar substrat ortamdan uzaklaştırılır ve aynı miktar taze substrat fermentöre eklenir. Bu şekilde yapılan sürekli iyileştirme ile besin maddelerinde, metabolitlerde, hücre sayılarında ve biyokütlede çok az dalgalanma ile dengeli bir gelişim sağlanır (Calsamiglia ve ark., 2002; Jensen ve ark., 2002).

SONUÇ

Enzimler biyolojik süreçlerin devamlılığı için vazgeçilmez ve özel proteinlerdir. Yapısında buldukları canlıda binlerce biyokimyasal süreci katalizlerler. Bilim ve teknolojiadaki gelişmeler enzimlerin tanımlanmasını ve izolasyonunu mümkün kılmıştır. Farklı kaynaklarından izole edilen ve saflaştırılan enzimler tıp ve eczacılık alanlarında ve gıda, yem, deri, kağıt, hayvan yemi, tekstil, deterjan teknolojileri gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Artan nüfusa ve talebe bağlı olarak endüstriyel ölçekli üretimler de artmıştır. Bir çok endüstriyel boyutlu üretimde kimyasal prosesler yerine, özellikle güvenli olduğu için, enzim bazlı prosesler tercih edilmektedir. Enzim bazlı proseslerin tercih edilmesinde etkili diğer bazı faktörler, kimyasallardan kaynaklı çevre zararı oluşturmaması, yüksek düzeyde verim ve proses kontrolü sağlamasıdır. Enzimler bitkisel, hayvansal veya mikrobiyal kaynaklardan elde edilebilir. Ekonomik olması nedeniyle ticari enzimler büyük ölçüde mikrobiyal kaynaklardan elde edilmektedir. Mikroorganizmalar, uygun fermentasyon teknikleri ile kısa sürede büyük miktarda üretim yapabilmektedirler. Mikroorganizmaların modifikasyonu (rekombinant DNA teknikleri) ile de endüstriyel ölçekli enzim üretimi yapılmaktadır. Ayrıca rekombinat DNA teknikleri ile ekstrem koşullarda canlılığını sürdüren (yüksek ve düşük sıcaklık ve pH ile yüksek tuz ve basınç) ekstremofillerin enzim üretiminde kullanım yolları denenmektedir. Mezofil mikroorganizmaların aksine, ekstrem koşullarda canlı kalabilen bu mikroorganizmalar eksterm (sıcaklık, pH, basınç vb.) koşullarda stabil kalabilen veya aktivite gösteren enzimler üretebilirler. Mikrobiyal kaynaklı enzimler üzerinde yapılan çalışmalar devam etmektedir ve bu enzimlerin büyük kısmı keşfedilmeyi beklemektedir. Mikrobiyal enzimlerin kullanım alanlarından biri de gıda endüstrisidir. Gıda endüstrisinde: yeni bir ürün oluşturmak, var olan ürünün özelliklerini modifiye etmek, ürün özelliklerini (duyusal ve yapısal) iyileştirmek, üründe, beslenme ve/veya teknolojik açılardan, fonksiyonellik oluşturmak veya geliştirmek gibi amaçlarla enzimlerden faydalanılmaktadır.

Gıda teknolojisinde kimyasal reaksiyonlara alternatif olarak enzim teknolojisinin kullanılması ile daha güvenli ürünler elde edilir. Enzimatik reaksiyonlar ılımlı koşullar altında gerçekleşebildiği için, aşırı koşulların gıda bileşenlerine vereceği zararlar bertaraf edilir. Enzimatik reaksiyonlarda, kimyasal reaksiyonlara göre daha az atık meydana gelir. Sonuçta enzimatik reaksiyonlar ile daha az kirlilik ve daha kaliteli ürün elde edilir. Ancak her ne kadar enzim preparatlarının canlı hücre içermesi çok nadir görülse de, genetik modifikasyon yoluyla enzim üretici suşların geliştirilmesinde, toksijenik ve patojenik olmayan suşların kullanılması, gıda güvenliği açısından önemlidir.

KAYNAKÇA

- Bairoch, A. (2000). The ENZYME database in 2000. *Nucleic Acids Research*, 28(1), 304-305. <https://doi.org/10.1093/nar/28.1.304>
- Bjerre, J., Rousseau, C., Marinescu, L., Bols, M. (2008). Artificial enzymes, “chemzymes”: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 81(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1653-5>
- Calsamiglia, S., Ferret, A., Devant, M. (2002). Effects of pH and pH Fluctuations on Microbial Fermentation and Nutrient Flow from a Dual-Flow Continuous Culture System. *Journal of Dairy Science*, 85(3), 574-579. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74111-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74111-8)
- Christy, M., Gopinath, L.R., Divya, I. (2014). A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 167-173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.010>
- Cook, P.F., Cleland, W.W. (2007). *Enzyme Kinetics and Mechanism*. pp. 397, New York: Taylor & FrancisGroup.
- de Souza Vandenberghe, L.P., de Carvalho, J.C., Libardi, N., Rodrigues, C., Soccol, C.R. (2016). Microbial Enzyme Factories: Current Trends in Production Processes and Commercial Aspects. In: G.S. Dhillon, S. Kaur (Eds.), *Agro-Industrial Wastes as Feedstock for Enzyme Production. Apply and Exploit the Emerging and Valuable Use Options of Waste Biomass*. (pp. 1-22), New York: Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802392-1.00001-0>
- D’Souza, V.T. (2003). Modification of Cyclodextrins for Use as Artificial Enzymes. *Supramolecular Chemistry*, 15(3), 221-229. <https://doi.org/10.1080/1061027031000078220>
- Frey, P.A., Hegeman, A.D. (2007). *Enzymatic Reaction Mechanisms*. pp. 809, New York: Oxford University Press.
- Fujii, M., Shimizu, M. (1985). Synergism of Endoenzyme and Exoenzyme on Hydrolysis of Soluble Cellulose Derivatives. *Biotechnology and Bioengineering*, 28(6), 878-882. <https://doi.org/10.1002/bit.260280615>
- Godfrey, T., West, S. (1996). *Industrial Enzymology*. pp. 609, Michigan: Stockton Press.
- Gouin, S.G. (2014). Multivalent Inhibitors for Carbohydrate-Processing Enzymes: Beyond the “Lock-and-Key” Concept. *Chemistry Europe*, 20(37), 11616-11628. <https://doi.org/10.1002/chem.201402537>
- Groves, J.T. (1997). Artificial enzymes. The importance of being selective. *Nature*, 389(6649), 329-330. <https://doi.org/10.1038/38602>
- Jackson, C.J., Gillam, E.M.J., Ollis, D.L. (2010). Directed Evolution of Enzymes. In H.W. (Ben) Liu, L. Mander (Eds.), *Comprehensive Natural Products II Chemistry and Biology, Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences*

- and Chemical Engineering, (pp. 723-749), <https://doi.org/10.1016/B978-008045382-8.00675-4>
- Jensen, B., Nebelong, P., Olsen, J., Reeslev, M. (2002). Enzyme production in continuous cultivation by the thermophilic fungus, *Thermomyces lanuginosus*. *Biotechnology Letters*, 24, 41-45.
- Khan, A.R., James, M.N. (1998). Molecular mechanisms for the conversion of zymogens to active proteolytic enzymes. *Protein Science*, 7(4), 815-836. <https://doi.org/10.1002/pro.5560070401>
- Kirby, A.J. (1996). Enzyme Mechanisms, Models, and Mimics. *Angewandte Chemie*, 35(7), 706-724.
- Kirk, O., Borchert, T.V., Fuglsang, C.C. (2002). Industrial enzyme applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 13, 345-351. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(02\)00328-2](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(02)00328-2)
- Korschelt, K., Nawaz Tahir, M.N., Tremel, W. (2018). A Step into the Future: Applications of Nanoparticle Enzyme Mimics. *Chemistry*, 24(39), 9703-9713. <https://doi.org/10.1002/chem.201800384>. Epub 2018 Apr 26.
- Krishna, C. (2005). Solid-State Fermentation Systems-An Overview. *Critical Reviews in Biotechnology*, 25, 1-30. <https://doi.org/10.1080/07388550590925383>
- Kuah, E., Toh, S., Yee, J., Ma, Q., Gao, Z. (2016). Enzyme Mimics: Advances and Applications. *Chemistry-A European Journal*, 22, 8404-8430. <https://doi.org/10.1002/chem.201504394>
- Le Roes-Hill, M., Prins, A. (2016). Biotechnological potential of oxidative enzymes from Actinobacteria. In: D. Dhanasekaran, Y. Jiang (Eds). *Actinobacteria*. <https://doi.org/10.5772/61321>
- Lee, J., Lee, S.Y., Park, S., Middelberg, A.P.J. (1999). Control of fed-batch fermentations. *Biotechnology Advances*, 17(1), 29-48. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(98\)00015-9](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(98)00015-9)
- Lilley, D. (2005). Structure, folding and mechanisms of ribozymes. *Current Opinion in Structural Biology*, 15(3), 313-323. <https://doi.org/10.1016/j.sbi.2005.05.002>
- Liu, L., Breslow, R. (2004). Polymeric and dendrimeric pyridoxal enzyme mimics. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 12(12), 3277-3287. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2004.03.062>.
- Lonsane, B.K., Ghildyal, N.P., Budiatman, S., Ramakrishna, S.V. (1985). Engineering aspects of solid state fermentation. *Enzyme and Microbial Technology*, 7(6), 258-265. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(85\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0141-0229(85)90083-3)
- Lu, W., Li, D., Wu, Y. (2003). Influence of water activity and temperature on xylanase biosynthesis in pilot-scale solid-state fermentation by *Aspergillus sulphureus*. *Enzyme and Microbial Technology*, 32(2), 305-311. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(02\)00292-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(02)00292-2)
- Makkar, R.S., Cameotra, S.S. (1999). Biosurfactant production by microorganisms on unconventional carbon sources. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2, 237-241.

- Makkar, R.S., Cameotra, S.S. (1997). Utilization of molasses for biosurfactant production by two *Bacillus* strains at thermophilic conditions. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74, 887-889.
- McDonald, A.G., Boyce, S., Tipton, K.F. (2009). ExplorEnz: the primary source of the IUBMB enzyme list. *Nucleic Acids Research*, 37(1), D593-D597. <https://doi.org/10.1093/nar/gkn582>
- Motherwell, W.B., Bingham, M., Six, Y. (2001). Recent progress in the design and synthesis of artificial enzymes. *Tetrahedron*, 57(22), 4663-4686. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)00288-5](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)00288-5)
- Ouedraogo, J.P., Tsang, A. (2021). Production of Native and Recombinant Enzymes by Fungi for Industrial Applications. *Encyclopedia of Mycology*, 2, 222-232. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819990-9.00046-9>
- Pandey, A., Soccol, C.R., Mitchell, D. (2000). New developments in solid state fermentation: I-bioprocesses and products. *Process Biochemistry*, 35(10), 1153-1169. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(00\)00152-7](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(00)00152-7)
- Patel, A.K., Singhanian, R.R., Pandey, A. (2017). Production, Purification, and Application of Microbial Enzymes. *Biotechnology of Microbial Enzymes*. In G. Brahmachari (Ed.). *Biotechnology of Microbial Enzymes Production, Biocatalysis and Industrial Applications*. (pp. 13-41), New York: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803725-6.00002-9>
- Prejanò, M., Alberto, M.E., Russo, N., Toscano, M., Marino, T. (2020). The Effects of the Metal Ion Substitution into the Active Site of Metalloenzymes: A Theoretical Insight on Some Selected Cases. *Catalysts*, 10(9), 1038. <https://doi.org/10.3390/catal10091038>
- Raveendran, S., Parameswaran, B., Ummalyama, S.B., Abraham, A., Mathew, A.K., Madhavan, A., Rebello, S., Pandey, A. (2018). Applications of Microbial Enzymes in Food Industry. *Food Technology & Biotechnology*, 56(1), 16-30. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.01.18.5491>
- Raynal, M., Ballester, P., Vidal-Ferran, A., van Leeuw, P.W.N.M. (2014). Supramolecular catalysis. Part 2: artificial enzyme mimics. *Chemical Society Reviews*, 43, 1734-1787. <https://doi.org/10.1039/C3CS60037H>
- Richter, K., Trager, A. (1994). L(+) lactic acid from sweet sorghum by submerged and solid state fermentations. *Acta Biotechnology*, 14, 367-378. <https://doi.org/10.1002/abio.370140409>
- Riordan, J.F. (1997). The role of metals in enzyme activity. *Annals of Clinical & Laboratory Science*. 7(2), 119-129.
- Rohwer, J.M., Hanekom, A.J., Crous, C., Snoep, J.L., Hofmeyr, J.H.S. (2006). Evaluation of a simplified generic bi-substrate rate equation for computational systems biology, *IET Systems Biology*, 153(5), 338-341. <https://doi.org/10.1049/ip-syb:20060026>
- Ruijter, G.J.G., Visser, J., Rinzema, A. (2004). Polyol accumulation by *Aspergillus ory-*

- zae at low water activity in solid-state fermentation. *Microbiology*, 150, 1095-1101. <https://doi.org/10.1099/mic.0.26723-0>
- Sayiner, Ö., Çomoğlu, T. (2016). Nanotaşıyıcı sistemlerde hedeflendirme. Ankara Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi Dergisi, 40(3), 62-79. https://doi.org/10.1501/Eczfak_0000000589
- Shahriari, M., Zahiri, M., Abnous, K., Taghdisi, S.M., Ramezani, M., Alibolandi, M. (2019). Enzyme responsive drug delivery systems in cancer treatment. *Journal of Controlled Release*, 308, 172-189. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.07.004>
- Singh, R., Kumar, M., Mittal, A., Kumar Mehta, P. (2016). Microbial enzymes: industrial progress in 21st century. *3 Biotech*, 6, 174. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0485-8>
- Singhania, R.R., Patel, A.K., Soccol, C.R., Pandey, A. (2009). Recent advances in solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 44(1), 13-18. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.019>
- Stanbury, P.F., Whitaker, A., Hall, S.J. (2017). *Principles of Fermentation Technology: Design of a fermenter*. pp. 803, London: Butterworth-heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099953-1.00007-7>
- Thapa, S., Li, H., Ohair, J., Bhatti, S., Chen, F.C., Al Nasr, K., Johnson, T., Zhou, S. (2019). Biochemical Characteristics of Microbial Enzymes and Their Significance from Industrial Perspectives. *Molecular Biotechnology*, 61, 579-601. <https://doi.org/10.1007/s12033-019-00187-1>
- Vellard V. (2003). The enzyme as drug: application of enzymes as pharmaceuticals. *Current Opinion in Biotechnology*, 14(4), 444-500. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(03\)00092-2](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(03)00092-2).
- Whitehurst, R.J., van Oort, M. (2010). *Enzymes in Food Technology*. pp. 368, 2nd ed., Iowa: Wiley-Blackwell.
- Xavier, S., Lonsane, B.K. (1994). Sugarcane press-mud as novel and inexpensive substrate for production of lactic acid in a solid state fermentation system. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 41, 291-295.
- Yang, G., Wang, J., Shao, W., Wang, S., Wu, B., Gao, B., He, B. (2023). Mussel-Inspired Electro-oxidation-Modified Three-Dimensional Printed Carriers for a Versatile Enzyme Immobilization Approach, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(4), 1375-1385. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05753>
- Yin, Y., Dong, Z., Luo, Q., Liu, J. (2012). Biomimetic catalysts designed on macromolecular scaffolds. *Progress in Polymer Science*, 37, 1476-1509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.001>
- Zhang, Y., Lynd, L.R. (2003). Quantification of Cell and Cellulase Mass Concentrations during Anaerobic Cellulose Fermentation: Development of an Enzyme-Linked Immunosorbent Assay-Based Method with Application to *Clostridium thermocellum* Batch Cultures. *Analytical Chemistry*, 75(2), 219-227. <https://doi.org/10.1021/ac020271n>

Bölüm 11

FLORESAN PROTEİNLERİN BİYOTEKNOLOJİDE KULLANIMI

Hülya KUDUĞ CEYLAN¹



¹ Arş. Gör. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi,
Temel Eczacılık Bilimleri Bölümü, Tokat, Türkiye, hulya.kudug@gop.edu.tr,
ORCID ID: 0000-0003-0365-2760

Giriş

Günümüzde yeşil domuz, yeşil kedi ya da transgenik floresan akvaryum balığı gibi popüler çalışmaların geçmişi yeşil floresan proteinin (green fluorescent protein –GFP) keşfine dayanmaktadır. Gerçekte GFP hikayesi uzun yıllar önce birkaç bilim insanının deniz canlılarının lüminesans özelliklerine olan ilgisi ile başlamıştır (Shimomura, Johnson, & Saiga, 1962). *Aequorea victoria*'a ait GFP'ye olan ilgi 1992 yılında klonlaması ve 1994 yılında in vivo etiketleme için floresan etiketi olarak kullanımı sonrasında daha çok dikkat çekmeye başlamıştır (Chalfie, Tu, Euskirchen, Ward, & Prasher, 1994; Prasher, Eckenrode, Ward, Prendergast, & Cormier, 1992). Tamamen genetik olarak kodlanmış bir etiket olan GFP, canlı hücrelerdeki ve organizmalardaki yapıların ve süreçlerin doğrudan görselleştirilmesini sağlayan benzersiz bir araç haline gelmiştir. Daha sonra, GFP ve benzeri floresan proteinlerin yapısı, biyokimyası ve biyofiziğine yoğun bir ilgi ortaya çıkmış, bu da FP'ler kullanılarak moleküler ve hücre biyolojisindeki temel problemleri çözmeye yönelik bilimsel çalışmaların çığ gibi büyümesine neden olmuştur.

Doğal olarak oluşan kemilüminesans (biyölüminesans) özelliğine sahip birçok GFP benzeri protein, hidra (Hidrozoa) ve mercan (Anthozoa) türlerinden keşfedilmiştir. Biyölüminesans özellikte olmayan bazı Anthozoa türlerinin de FP'lere ve GFP benzeri floresan kromoproteinlere sahip olduğu görülmüştür (Lukyanov et al., 2000; Matz et al., 1999). Bunun ötesinde, yakın zamandaki çalışmalar deniz kabukluları, taraklı denizanası, batrak (amfiyoksüs) gibi evrimsel olarak uzak türlerde farklı FP'leri ortaya çıkarmıştır (Deheyn et al., 2007; Shagin et al., 2004). İlk olarak 1979 yılında tanımlanan ve sonra 1993'te tekrar tanımlanan "orjinal" GFP benzeri kromoforun ardından, DsRed (Gross, Baird, Hoffman, Baldrige, & Tsien, 2000) ve Kaede (Mizuno et al., 2003) benzeri gibi kırmızı kromoforlar ve diğer kromofor varyantları tanımlanmıştır. Çoklu spektral FP varyantlarının keşfi ve gelişimi canlı sistem çalışmalarında devrim yaratmıştır. Elde edilen başarılar GFP'nin keşfi ve geliştirilmesi adına 2008 yılında Nobel Kimya Ödülüne layık görülmüştür.

Tablo 1. Floresan proteinlerin biyoteknolojide uygulama alanları

Floresan Protein Uygulamaları			
Yapısal Uygulamalar	Fonksiyonel Uygulamalar		
Protein Etiketleme	Lokalizasyon	Protein Etkileşimleri	Dinamik ölçümler
	Mobilite		Kümülatif ölçümler
	Turnover katsayısı	Sensör	Protein aktivitesi
	Yaşam ömrü		Analitler
Nükleik asit etiketleme	Genom lokusları	ROS	Membran potansiyeli
	mRNA		Hücre ölümü
Organel Etiketleme	Morfoloji	ilaç tarama	Protein inaktivasyonu
	Hücre içi mobilite		ROS sinyali
	Bölünme takibi	Protein Turnover	
Organizma Etiketleme	Tüm organizma	Promotör aktivitesi	Sensör
	Transgenik belirleme		Promotör aktivasyonu
			Aç/kapa
			Aktivasyon

GFP ve farklı renklerdeki varyantları, canlı sistemlerin organizasyonunu ve işlevlerini incelemek için çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. FP'lere ait uygulama alanları Tablo 1'de özetlenmiştir. FP'ler birlikte kodlandığı proteinlerin hücre lokalizasyonları, hareketleri, turnover katsayıları ve yaşlanmalarını (yani protein sentezi sonrasında geçen zaman) gözlemlemeyi mümkün kılmaktadır. Nükleik asitler, RNA veya DNA bağlayıcı protein altbirimleri ile etiketlenebilmektedir. Özel protein lokalizasyon sinyalleri ile hücre organellerine hedeflenen FP'ler, hücre morfolojisini, füzyon ve fizyon olaylarını, hücre bölünmesi sırasında ayrışmayı görüntülemeyi sağlamaktadır. FP'ler, hücre ve doku etiketlemede morfoloji, lokasyon, hücre hareketleri (örn. embriyonik gelişim ve tümör oluşumu), mitotik aşamalar ve diğer birçok önemli hücre olayı görselleştirmede kullanılan araçlardır. Bunların yanı sıra, akvaryum balıkları ve diğer evcil hayvanlarda transgenik ve doğal fenotipteki organizmalar arasında karşılaştırma yapmak için FP'ler kullanılmaktadır.

Ayrıca, FP'ler aracılığı ile karmaşık fonksiyonel çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Canlı hücrelerdeki protein-protein etkileşimlerini görüntülenmesi, hedef bir promotörün açılıp kapanması, iki promotörün eş zamanlı aktifleşmesi ve bir promotör aktivasyonunun süreci doğrudan gözlemlenebilmektedir. FP uygulama alanlarından bir diğeri, çevresel değişikliklerde spektral karakteristik özellikler gösteren floresan sensörleridir. Bu genetik olarak kodlanmış sensörler ile, hedef enzimlerin (örneğin protein kinazlar ve proteazlar) aktiviteleri görselleştirilebilirken hücre içi iyon, metabolit ve önemli moleküllerin (H^+ , Ca^{2+} , Cl^- , H_2O_2 , cAMP, vb.) konsantrasyonları ve diğer hücre parametreleri ölçülebilmektedir. Hedef bir proteinin inaktif hale getirilmesi,

seçici hücre ölümü, hücre içi reaktif oksijen türleri (ROS) sinyalinin incelenmesi amacıyla FP ile ilişkili ve ışık ile indüklenebilir ROS üretimi ortaya çıkan başka bir çalışma alanıdır. FP tabanlı yöntemlerin bu potansiyeli sadece temel çalışmalarda değil, aynı zamanda ilaç denemelerinde yüksek verimde tarama ve klinik öncesi çalışmalarında kullanılmaktadır.

Doğal çeşitliliği ve biyokimyasal özelliklerinin incelemesi amacıyla yapılan çalışmalar çok çeşitli FP'leri kullanıma sunmuştur. FP'lerin uygulanabilirliği ile birlikte, FP ailesinin üyelerinin filogenetik ve biyolojik işlev, üç boyutlu yapı, kimyasal yapı ve kromoforların oluşum mekanizmaları, foto-fiziksel özellikleri vb. akademik olarak ilgi çekmektedir. FP biyokimyası ile ilgili elde edilen yeni veriler yeni FP varyantlarının ortaya çıkmasını tetiklemektedir. Son olarak, deniz canlılarındaki FP temelli çalışmalar, bu canlıların fizyolojisi, ekolojisi ve davranışları ile ilgili farklı özelliklerini ortaya çıkarmaktadır (Chudakov, Matz, Lukyanov, & Lukyanov, 2010).

Yeni FP varyantlarının geliştirilmesinde ve varolan varyantlarının özelliklerinin geliştirilmesinde genetik mühendisliği uygulamaları kaçınılmazdır. *Aequorea victoria*'a ait GFP'nin keşfi ile başlayan FP'lerin biyoteknolojideki başarısı, genetik mühendisliği katkılarıyla her geçen gün daha da artmaktadır. Bu çalışmada floresan proteinler ve genetik mühendisliğinin birlikte kullanıldığı biyoteknolojideki uygulama alanları ele alınmıştır.

Floresan etiketleme uygulamaları

Canlı sistemlerde gerçek zamanlı olarak protein ekspresyonu, lokalizasyonu, translokasyonu, protein-protein etkileşimleri ve protein degradasyonunu görselleştirmek için kullanılan protein etiketleme en popüler FP uygulamalarından biridir. İlgili bir genin FP ile füzyon bir şekilde klonlanması, bir hücre ya da organizmaya transfer edilmesi ve ardından ilgili genin eksprese edilmesi yoluyla proteinin lokalizasyonu, ilk olarak 1994 yılında gerçekleştirilmiştir (S. Wang & Hazelrigg, 1994).

Bir proteinin *Aequorea* türlerinden elde edilen doğal bir FP monomeri ile füzyonu, bu proteinin hücre içerisinde lokalizasyonunu ya da işlevini etkilememektedir. Doğal olarak tetramerik yapıdaki FP'lerin monomerik varyantları, çoğunlukla ilgili protein ile iyi bir füzyon oluşturmaktadır (Shaner, Patterson, & Davidson, 2007). Bununla birlikte zaman zaman bu proteinlerden bazılarının, dimerizasyon ya da hidrofobik arayüzlerinin spesifik olmayan etkileşimleri nedeniyle problemlere neden olduğu bilinmektedir. Bu olası problemlerin önüne geçebilmek için farklı renklerdeki FP çeşitleri ile farklı füzyon denemelerinin yapılması ve lokalizasyon modelinin EGFP gibi güvenilir doğal monomer ile karşılaştırılarak denenmesi önerilmektedir.

Birçok durumda, füzyon için proteinin uç bölgelerinden biri, diğer uç bölgesinin göstereceği spesifik etkileşimler ya da protein lokalizasyonundaki

rolü nedeniyle tercih edilmektedir. Bu bağlamda, belirli bir FP ile ilgi füzyonunun başarılı olması ile ilgili literatür verileri diğer monomerik FP'ler ile ilgili tahminlere olanak sağlamaktadır. Bazı durumlarda, bir füzyonun performansı, potansiyel sterik çatışmaları önleyebilen, FP ile ilgilenilen protein arasına, çeşitli amino asit kalıntılarının esnek bir Gly bakımından zengin bağlayıcı eklenerek geliştirilebilmektedir. Bazen, çalışılan bir proteinin her iki ucunun önemli olması durumunda, FP'nin ilgili protein dizisinin içine yerleştirilmesini gerektirebilmektedir (Baehler, Biondi, van Bemmelen, Véron, & Raymond, 2002; Moradpour et al., 2004; Teng et al., 2023). Söz konusu füzyon yapının ekspresyon seviyesi, FP'e ait transkripsiyon ve translasyon verimliliği, mRNA stabilitesi, FP olgunlaşma oranı ve protein stabilitesinden doğrudan etkilenmektedir. Stabilite, hedef proteinin turnover sayısı bir hücre içerisindeki füzyon yapının yarı ömrünü belirleyeceğinden dolayı özellikle önemlidir.

Bir füzyon yapısından beklenen ekspresyon seviyesi, güvenilir bir görüntüleme için yeterli sinyal ve canlı hücrenin biyokimyası ile minimum etkileşime girme arasında dengelenmektedir. Bu ekspresyon seviyesi, proteinin protein topluluğundaki fonksiyonel rolüne ve aynı zamanda füzyon halindeki bir FP'nin özelliklerine bağlı olarak her protein için özgün bir özellik göstermektedir. Bazı durumlarda, aşırı-ekspresyonun zararlı etkilerden kaçınmak için, hedef bir proteinin bir veya birkaç alt biriminin silinmesi gerekli olabilmektedir (Sakaue-Sawano et al., 2008).

Ekspresyon seviyeleri, hem çok miktarda sentezlenmiş proteinin yığınlarının etkisinin canlı hücreye zarar vermemesi hem de hedef proteinlerin renkli ve yeterince parlak görüntülenebilmesi açısından önemlidir. Ayrıca, bu füzyonların ekspresyonları benzer seviyelerde olmalıdır; aksi halde baskın olan proteinin diğer spektral kanallara geçme ihtimali olabilmektedir. İstenen bir ekspresyon seviyesi dengesinin elde edilmesinin bir yolu, geçici transfeksiyon için kullanılan vektörlerin konsantrasyonunun ayarlanmasıdır. Genel olarak, ekspresyon seviyesi transfekte hücreler arasında büyük ölçüde değişiklik gösterir ve bu yüzden nispeten düşük fakat kolayca saptanabilir bir sinyal üreten hücrelerin hücre popülasyonundan seçilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, tekrarlanabilirliği yüksek sonuçlar elde edebilmek için kararlı hücre hatlarını oluşturmak tercih edilmektedir.

Fotoağartma teknikleri

Fotoağartma, kloroforların floresan olma yeteneklerini kaybederek floresan sinyalinin azalmasına yol açan bir durum iken, ilgili protein ile FP füzyon yapısının ve floroforların hareketliliğini incelemek için kullanılabilir. Fotoağartma teknikleri, hedef bir proteinin FP ile füzyonunun canlı hücre içerisindeki hareketliliğini ve aynı zamanda dış faktörlerin hareketlilik üzerindeki etkisini belirlemeye imkân sağlamaktadır (Lippincott-Schwartz,

Altan-Bonnet, & Patterson, 2003). Bu durum, bir proteinin hücre içindeki hareketinin, fonksiyonel aktivitesi ve diğer moleküller ile etkileşimi ile sıkı bir şekilde bağlantılı olmasından dolayı önemlidir.

En yaygın olarak kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. Fotoağartma sonrası floresan geri kazanımı (fluorescence recovery after photobleaching -FRAP) olarak bilinen yöntem, yoğun ışık ışıması ile küçük ilgili bir bölgenin ağartılması ve ardından floresan geri kazanım oranının izlenmesine dayanmaktadır. Bu oran, ağartılmamış proteinin, hücrenin diğer bölgelerindeki foto-ağartılmış bölgelere göç oranı ile belirlenir. Fotoağartmada floresan kaybı (fluorescence loss in photobleaching-FLIP) olarak bilinen diğer yöntemde, tüm hücre tekrar tekrar görüntülenirken, bir floresan hücre küçük bir bölge içinde tekrar tekrar ışıkla ağartılmaktadır. Beyazlatılmakta olan alana bağlı olan hücrenin herhangi bir bölgesi, hareketli proteinlerin bu alana yanal hareketi nedeniyle yavaş yavaş floresan kaybetmektedir. Buna karşılık, bağlantısız bölgelerdeki floresan etkilenmemektedir. FLIP, bir proteinin belirli bir hücre bölmesi boyunca tek tip hareket edip etmediğini veya hareketini engelleyen etkileşimlere girip girmediğini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Lippincott-Schwartz et al., 2003).

Fotoağartma tekniklerinin, hızlı bir proteinin hareketinin izlenmesindeki zorluklar, fototoksosite gibi ışığa bağlı yan etkiler ve FP'lerin bazı karmaşık davranışları dahil olmak üzere çeşitli sınırlamaları bulunmaktadır. Bununla birlikte, bu teknikler protein hareketliliğini güvenilir bir şekilde ölçmek ya da en azından proteinlerin hareketlerini birbirlerine göre karşılaştırmak için bir yol sağlamaktadır ve bu amaç ile iyi karakterize edilmiş bir foto-davranışa sahip FP'ler kullanılmaktadır. FP'leri ile fotoğarma teknikleri, canlı hücrelerde proteinlerin dinamik davranışları hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Dikkat çekici bir örnek olarak, FRAP yöntemi aracılığı ile nükleer proteinlerin hareketliliğinin aydınlatılması nükleer prosese ait literatür bilgilerinde değişiklik ile sonuçlanmıştır (Phair & Misteli, 2000).

Rekombinant protein üretiminde FP'lerin kullanımı

Rekombinant protein (RP) sentezi ve RP'lerin katlanmasında FP'ler raportör olarak kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin Jones ve arkadaşları *E. coli*'de, RP üretimini izlemek için GFP kullanılmıştır ve ilgili beş rekombinant genin C-terminaline füzyon halde bulunan GFP'nin sadece RP sentezini değil, aynı zamanda doğru RP katlanmasını sağladığını belirtmişlerdir (Jones et al., 2004). Bu yaklaşım, daha sonra genellikle inklüzyon cisimcikleri formunda üretilen ve doğru şekilde katlanmış RP'lerin yüksek verimde azaltılmış stresli RP üretim yöntemlerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Sevastyanovich et al., 2009).

GFP miktarının floresans ölçümüyle (örneğin pleyt okuyucularda) kolay olması, GFP füzyon proteinlerinin yüksek verimli çalışmalar için popüler

seçenekler olduğunu göstermektedir. Coutard ve ark. (2008), 96 kuyucuklu pleyt kullanarak on adet çözünür proteinin üretimine yönelik optimum koşulları, C-terminal GFP füzyonları ve çözünür hücre fraksiyonunun floresan tayini ile belirlemişlerdir (Coutard et al., 2008). Böylece bu yöntem ile daha maliyetli Western analizi kullanılarak çözünebilir fraksiyonda saptanmayan proteinler için bile en uygun koşulları belirlenmiştir. Bunun yanısıra Kuduğ Ceylan ve ark., farklı FP'leri *E. coli*'de rekombinant olarak üretmişler ve biyoreaktörlerde yüksek verimlere ulaşmışlardır (KUDUĞ CEYLAN, İMAMOĞLU, & GÖKÇE, 2020; KUDUĞ, ATAMAN, İMAMOĞLU, DÜZGÜN, & GÖKÇE, 2019).

RP üretim sistemlerinde, RP-FP füzyonlarının bakteriden memelilere kadar çok çeşitli organizmalarda üretilibilmeleri önemli bir avantajdır. RP-FP füzyon yaklaşımı *E. coli*'de yaygın olmakla birlikte *Pichia pastoris*'te de kullanılmıştır. Zheng ve ark. (2022) sisteyince zengin küçük peptitler olan ve sinir biliminde yaygın olarak kullanılan 23 adet konoktoksini GFP ile füzyon halde rekombinant olarak üretmişlerdir (Zheng et al., 2022). Benzer şekilde, *Aspergillus niger* (Roth & Dersch, 2010) ve memeli CHO hücre hattında (Zhu et al., 2022) GFP füzyonu ile RP üretimi başarı ile gerçekleştirilmiştir.

Hücre içi lokalizasyonların belirlenmesinde FP'lerin kullanımı

Proteinlerin hücre içindeki dağılımı oldukça iyi organize edilmektedir ve protein trafiği, hücre içinde adres etiketleri olarak görev yapan konsensüs peptid dizileri tarafından kontrol edilmektedir. Bir FP veya FP-tabanlı sensör, organel görüntüleme, füzyon-fisyon oluşumlarını inceleme ve hücre parametrelerin lokal olarak izlenmesi amacıyla çeşitli hücre içi bölümlere hedeflenebilmektedir. Hedeflenen bir molekül, hedeflenen bir hücre bölümüne verimli bir şekilde talınmasını sağlayan sinyal motifleri bulunmaktadır (VanEngelenburg & Palmer, 2008). Bazı durumlarda, güvenilir bir hedeflemenin gerçekleşmesi için ilgili sinyalin tekrarlanması gerekmektedir (Palmer et al., 2006). Bu sinyal motifleri, sadece belirli bir bölüme ilgi konusu bir proteini hedeflemek için değil, aynı zamanda tasarlanmış fakat hedeflenmemiş bir yapının istenmeyen hedeflenmesini önlemek için de kullanılabilir. Bu durumda, linker tasarlanırken veya NH₂ ve COOH uçlarının modifikasyonları yapılırken bu "adres etiketi" sekanslarından kaçınılmalıdır; aksi halde, tasarlanan protein istenmeyen bir şekilde nükleus, peroksizom vb. kısımlara hedeflenebilmektedir.

FP'ler aracılığı ile promotörlerin izlenmesi

İlgili bir promotörün kontrolü altında klonlanan bir FP, belirli bir genetik ortamda, belirli hücre ve dokularda, özellikle de zamanla ve bir dış etkiye yanıt olarak promotör aktivitesini etkileyebilmektedir (Chalfie et al., 1994; Plautz et al., 1996). Enzim bazlı denemelerle karşılaştırıldığında, bu yaklaşım daha düşük bir hassasiyete sahiptir, fakat ekzojen girişim olmadan in vivo gö-

rüntülemeyi ve farklı FP raportörlerini kullanarak çeşitli promotörlerin çok renkli floresan görüntülenmesini mümkün kılmaktadır.

Promotör aktivitenin izlenebilmesi için bir FP raportör seçerken iki temel faktör göz önünde bulundurulmalıdır: FP'nin olgunlaşma hızı ve hücredeki yarı ömrü (turnover katsayısı). Bir FP'nin olgunlaşması, saptanabilir bir floresan sinyalinin görüntülenmesi için zaman belirleyici bir adımdır. FP kümelenmeleri oluşmadığı ve toksisiteye yol açmadığı sürece bir FP'nin monomerik yapıda olması, promotör aktivitesinin takibi için gerekli olmadığı unutulmamalıdır. Bu nedenle, hızlı olgunlaşan tetramerik FP'ler bu amaç için başarıyla kullanılabilir. FP'lerin bir kısmının olgunlaşma yarı süresi birkaç dakika kadar kısa olabilmektedir.

Her bir FP, belirli bir ekspresyon sisteminde karakteristik bir turnover hızına sahiptir. Bu nedenle, bir promotörün inaktivasyonu, raportör floresan sinyalinin hemen yok olmasına yol açmaz, saatler ve hatta günler boyunca sinyal stabil kalabilmektedir (Corish & Tyler-Smith, 1999). Bununla birlikte, FP yaşam süreleri, uygun alt birimlerin veya destabilizasyon sinyallerinin füzyonu ile modifiye edilebilmektedir. Stabilizasyonunu kaybetmiş FP'lerin daha hızlı turnover katsayıları vardır ve floresan özelliği promotör inaktivasyonundan hemen sonra kaybolmaktadır (Li et al., 1998). Bu nedenle, doğru bir promotör aktivitesinin belirlenmesinde hızlı olgunlaşan ve hızlı bozulan FP'ler tercih edilmektedir. Bu tür FP raportörleri ile sıralı aktivasyonun yanı sıra, ilgili promotörlerin inaktivasyonu da izlenebilir ve böylece canlı sistemlerde gen düzenleyici ağ sistemleri ve döngüsel süreçlerin altında yatan mekanizmalar anlaşılabilir.

Zamanlayıcı moleküller olarak FP'ler

Zamana bağlı olarak rengini değiştiren ve bu nedenle zamanlama aracı olarak da nitelendirilen FP'ler, geçici ekspresyonların geriye dönük olarak zamanlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu zamanlayıcı FP'ler, dakikalardan saatlere ve hatta günlere değişebilen çeşitli olgunlaşma oranları ile karakterize edilir ve bu nedenle çeşitli zaman ölçeklerinde biyolojik süreçlerin sürelerinin araştırılmasına olarak sağlamaktadır.

DsRed-E5 2000 yılında tanımlanan ilk zamanlayıcı FP'dir (Terskikh et al., 2000). DsRed-E5, sentezden sonra birkaç saat içinde yeşil floresan üretir, ancak daha sonra kırmızı bir floresan forma dönüşmektedir. Bu floresan değişiklikler, bir tetramer içindeki kromoforların bazılarının kırmızı yerine yeşil GFP-benzeri form şeklinde üretildiğini ve zamanla kırmızı kromoforlara olgunlaşarak tetramerik FRET şeklinde uyarıcı enerjiyi yeşil olanlardan "çalmaya" başladığını göstermektedir (Verkhusha, Chudakov, Gurskaya, Lukyanov, & Lukyanov, 2004). Bu nedenle, yeşil renkli olan dokular, hücreler veya hücresel organeller, DsRed-E5'in yeni üretilmiş olduğunu anlamına gelirken, kırmızı floresans, en azından birkaç saat önce proteini eksprese eden bölgele-

ri işaretlemektedir. Kırmızı floresanın yeşil floresansa oranı, eksprese edilen proteinin yaşı ile orantılıdır ve bu nedenle karşılık gelen promotör aktivasyonundan itibaren geçen zamanı gösterebilmektedir. Bu durum, çeşitli dokularda gen ekspresyonunun takip etmek için (Mirabella, Franken, Van Der Krogt, Bisseling, & Geurts, 2004), kalıcı promotör aktivitesi gösteren hücrelerden yeni aktive olmuş hücreleri ayırt etmede (Miyatsuka, Li, & German, 2009), organellerin yaşa bağımlı dağılımını analiz etmek için kullanılmaktadır (Duncan et al., 2003; Solimena & Gerdes, 2003).

Bununla birlikte, tetramerik FP'ler genellikle diğer proteinlerle füzyon için tercih edilmemektedir. Bunun yerine, hızlı, orta ve yavaş floresan zamanlayıcı özelliklerinin hepsine sahip monomerik mCherry temelli zamanlayıcı FP çalışmalarında, floresan rengin birkaç saatten bir güne kadar zaman aralıklarında maviden kırmızıya değiştiği görülmektedir (Subach et al., 2009). Monomerik zamanlayıcılar ile eşzamanlı olarak canlı hücrelerdeki lokalizasyon ve ilgili proteinlerin yaşı takip edilebilmektedir ve böylece yeni üretilen proteinlerin hücre içindeki yolculuğunun izlenmesini sağlamaktadır.

FP'ler ile hücre ve doku etiketleme

Uygun bir genetik içeriğe sahip ve spesifik bir promotörün kontrolü altındaki bir FP, tüm hayvan, organ, doku ve hücre kültüründe belirli hücre tiplerinin görselleştirilmesine yardımcı olabilmektedir. Bu durum özellikle immünoloji (Halin, Mora, Sumen, & Von Andrian, 2005; Mempel, Scimone, Mora, & Von Andrian, 2004), nörobiyoloji (Hirrlinger et al., 2005; Livet et al., 2007; Sugita & Shiba, 2005; Vincent et al., 2006; Young & Feng, 2004), gelişim bilimi (Chudakov et al., 2003; Passamaneck, Di Gregorio, Papaioannou, & Hadjantonakis, 2006; Terskikh et al., 2000), transplantoloji (Fraser et al., 2005; Nyqvist et al., 2005; F. Wang et al., 2009) ve karsinogenez (Hoffman, 2005, 2009; Turchin et al., 2008; Yang et al., 2000; Yu et al., 2004) gibi alanlarda önemlidir.

Canlı sistemlerinde farklı hücre tiplerinin yerlerini görselleştirmek için birçok FP kullanılabilir. Ayrıca, rastgele rekombinasyon ile elde edilen çeşitli FP'lerin karışımının, floresan mikroskobu ile ayırt edilebilen 100'den fazla renk tonu ile çok renkli hücre etiketlemesini mümkün kıldığı bildirilmiştir (Livet et al., 2007). Bu yöntem, FPs kullanılarak geliştirilen en başarılı uygulamalardan biri olarak gösterilmektedir. Brainbow denilen bu yöntem, kullanılarak çok renkli hücre etiketlemesi gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmada tek bir promotörün kontrolü altında farklı *lox* bölgeleri tarafından ayrılan farklı üç FP'nin (kırmızı, sarı ve mavi) bulunduğu bir kasetin, çoklu rasgele kopyalar ile genoma eklendiği olası varyantlar oluşturulmuştur. Cre rekombinazın geçici aktivasyonu, önceden kestirelemeyen rekombinasyon olayları ile sonuçlanmış, böylece her bir hücre, her FP'nin farklı miktarlarını eksprese etmiştir ve farklı renklerde görüntülenmiştir.

Promotör takibine benzer şekilde, FP'lere yönelik mühendislik uygulamaları, canlı hücrelerde moleküler değişimleri görselleştirmek için güçlü bir yaklaşım olabilmektedir. Bunun bir örneği, canlı dokularda hücre döngüsü ilerlemesinin gerçek zamanlı izlenmesi için geliştirilen Fucci (Sakaue-Sawano et al., 2008) adlı tekniktir. Bu teknik, hücre döngüsünün belirli aşamalarında hızlı degradasyona neden olan uygun protein alanlarına füzyon haldeki yeşil ve kırmızı FP'leri kullanmaktadır. Sonuç olarak, kırmızı ve yeşil floresan sinyalleri faz dışında salınır: G1 fazındaki tüm hücreler kırmızı olarak işaretlenirken S / G2 / M fazındaki hücreler yeşil olarak işaretlenmektedir. Bu teknik transgenik hayvanlarda ve zaman aralıklı görüntüleme daha iyi sonuçlar vermektedir, böylelikle bölünen hücrelerin gelişimi, tümör ilerlemesi, canlı hücrelerin bölünmesi ve yeniden dağılımının tespit edilmesine olanak sağlamaktadır.

Hayvalarda protein, hücre ve dokuların floresan görüntülenmesindeki temel zorluk, melanin ve hemoglobin tarafından ışığın emilimi ve saçılmasıdır. Işık dalga boyu arttıkça hem absorpsiyon hem de saçılma daha az belirginleşmektedir. Canlı dokularda görüntüleme için en şeffaf olan optimal "optik pencere", 650-700 ve 1.100 nm arasında kabul edilmektedir (König, 2000). Bu nedenle, uzak veya yakın kızılötesi FP çalışmalarındaki gelişmelerin, genetik olarak kodlanmış bir etiket kullanılarak tüm organizmayı görüntüleme hassasiyeti artırmaya yardımcı olması beklenmektedir. Şu anda, tüm organizmayı görüntüleme için tercih edilen FP'lerden biri, 635 nm'de pik veren ve 700 nm'nin çok ötesine yani spektrumun kızıl ötesi kısmına uzanan bir FP olan Katushka'dır (Shcherbo et al., 2007). Katushka, 650 nm'nin ötesinde, bugüne kadar bildirilen diğer tüm FP'lere kıyasla çok daha iyi parlaklık gösterir ve bu nedenle iyi bir duyarlılık sağlamaktadır (Deliolani et al., 2008; Hoffman, 2008; Shcherbo et al., 2007). Bununla birlikte, Katushka dahil olmak üzere diğer uzak kızıl ötesi kırmızı FP'lerin uyarılma maksimumu hala en düşük dalga boyu aralığında (590 nm ve daha düşük) yer almaktadır. Bu nedenle, FP absorpsiyonu ile verimli bir uyarım gerçekleşmesi için 633 nm dalga boyuna sahip lazer ışığı veya diğer daha derinden nüfuz eden uzak kırmızı ışık kaynakları kullanılması gerekmektedir. Bu bağlamda, 600 nm'de maksimum uyarım gösteren mNeptune olası bir seçenek olarak görülmektedir (Lin et al., 2009). Alternatif olarak, canlı dokularda etkili uyarım, kızılötesi dalga boylarını kullanan iki foton uyarımı ile de elde edilebilir (Drobizhev, Tillo, Makarov, Hughes, & Rebane, 2009).

Tüm organizma görüntülenmesinde, kızıl ötesinde parlak bir yayılım gösteren FP'nin üretilmesinin iyi bir çözüm olacağı düşünülmektedir. Ancak, kızılötesi, FP çalışan araştırmacılar için ulaşılması zor bir zirve olarak görülmektedir. Yakın zamanda, bakteriyel fitokromlara dayalı genetik olarak kodlanmış kızılötesi etiketleme için alternatif bir çözüm olarak geliştirilmiştir. Düşük parlaklığına ve bir kofaktör olan biliverdin enjeksiyonu gereksini-

mine rağmen bu etiket, tüm dokularda floresan görüntüleme için ümit verici olduğu düşünülmektedir (Shu et al., 2009).

Canlı dokularda FP'lerin daha iyi görüntülenmesi için birtakım görüntüleme teknikleri geliştirilmiştir. Örneğin canlı dokularda derin yüksek çözünürlüklü görüntüleme tekniği olan multispektral opto-akustik tomografi (Multispectral Optoacoustic Tomography-MSOT) kontrast oluşturmada FP'leri kullanan bir tekniktir (Razansky et al., 2009). Bu teknik, fotoakustik görüntüleme tomografisini ve seçici düzlem aydınlatma mikroskobu (Selective-Plane Illumination Microscopy-SPIM) ile kalın bir örnekte FP dağılımını yeniden yapılandırır ve böylece FP etiketli hücrelerin birkaç milimetre derinlikte tanımlanmasını mümkün kılmaktadır (Huisken, Swoger, Del Bene, Wittbrodt, & Stelzer, 2004; X. Wang et al., 2003).

FP'ler ile DNA ve RNA etiketleme

Canlı hücre çalışmalarında, mRNA'nın in vivo görüntülenmesi, lokalizasyon ve hücre içindeki dinamiği oldukça önemlidir. FP'ler kullanılarak gerçek zamanlı mRNA etiketleme ve izleme için çeşitli teknikler önerilmektedir. Bu teknikler, canlı hücrelerde spesifik mRNA moleküllerinin doğrudan floresan etiketlenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca hem mRNA hem de FP yapıları genetik olarak kodlanabilmesinden dolayı, bu teknikler stabil hücre hatları ve transgenik hayvanlarda potansiyel olarak uygulanabilir niteliktedir.

En basit şekilde açıklamak gerekirse, FP ve RNA-bağlanma altbirimi ile füzyon oluşturulurken, bu altbirimi tanıyan RNA motifi ve hedef mRNA arasında füzyon oluşturulur. Sinyalin çoğaltılması için RNA motifinin çoklu kopyaları eklenebilmektedir. Eğer RNA-bağlanma alt birimi diziye oldukça spesifik ise ve ilgili hücrelerde hedef RNA motifi mevcut değilse, bu yaklaşımda mRNA etiketlenmesi yüksek duyarlılık ve özgüllük ile sonuçlanır. Tasarlanan ilk altbirim-mRNA çifti olarak spesifik saç tokası faj RNA ve ona bağlanan bakteriyofaj kılıf proteini MS2 önerilmiştir (Beach, Salmon, & Bloom, 1999; Bertrand et al., 1998). Bu çift birçok uygulamada başarıyla kullanılmıştır (Querido & Chartrand, 2008; Rodriguez, Condeelis, Singer, & Dichtenberg, 2007). Bu yaklaşımın başka bir altbirim-mRNA çifti (Daigle & Ellenberg, 2007) ile birleştirilmesi sonucu iki mRNA'nın eşzamanlı çift renkli etiketlenmesini sağlamıştır (Lange et al., 2008). Fakat bu yaklaşımda bağlanmamış FP molekülleri tarafından üretilen yüksek arka plan sinyal önemli bir kısıttır. Bu problem, FP'nin düşük ekspresyon seviyeleri veya çekirdeğin hedeflenmesi ile kısmen çözülebilmektedir (Fusco et al., 2003).

Tüm bu yaklaşımlar bir protein altbirimi tarafından tanınan RNA motiflerinin kullanılmasını ifade etmektedir. Bir FP'nin ilgili bir proteine füzyonu, o proteinin fonksiyonunu bozabileceği gibi RNA motiflerinin mRNA'ya füzyonu canlı hücre içindeki davranışı değiştirebilmektedir. Bu önemli durum, RNA etiketleme teknikleri için genel kaygıya neden olmaktadır ve bu

nedenle mRNA yapıları tasarlanırken ve sonuçları yorumlanırken göz önünde bulundurulmalıdır.

Canlı hücrelerde kromozomal hareketleri izlemek için FP'ler ile ilgili çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerde, FP'ler, birkaç spesifik bağlanma bölgesi taşıyan transkripsiyon faktörüne bağlanan DNA-bağlanma altbirimleri (Kato & Lam, 2001; Matzke, Huettel, Van Der Winden, & Matzke, 2005; Robinett et al., 1996) ya da spesifik DNA dizilerini tanıyan çinko parmak DNA-bağlanma altbirimleri (Lindhout et al., 2007) ile füzyon oluşturulmuştur. Ayrıca FP'ler histonlar (Kanda, Sullivan, & Wahl, 1998) veya sentromer bağlayıcı bölgeler (Henikoff, Ahmad, Platero, & Van Steensel, 2000) gibi kromatin içindeki proteinlere füzyon edilerek kromozomal dinamikleri görselleştirmek için uygulanmaktadır.

Sonuç

Floresan proteinler (FP'ler) hücre içi hücre içi biyokimyasal mekanizmaların görüntülenmesinde yaygın olarak kullanılan biyolojik araçlardır. Floresan proteinlerin floresan etiket olarak kullanımı, bir denizanası türü olan *Aequorea victoria*'ya ait yeşil floresan protein (GFP)'nin keşfi ile başlamıştır. GFP ve çeşitli deniz canlılarından elde edilen floresan proteinler, tüm görünür spektrumları kapsamakta olup, çok renkli etiketleme ve protein etkileşimi çalışmaları için çeşitli alternatif olanaklar sunmaktadır. Genetik mühendisliği çalışmaları, farklı floresan protein varyantlarının oluşturulmasına ve parlaklık, olgunlaşma süresi ve stabilite gibi önemli özelliklerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Gelişmiş özelliklerdeki floresan proteinler, hücre içinde DNA, RNA ya da protein etiketleme, hedef moleküllerin hücre içindeki lokalizasyonlarının belirlenmesi, enzim aktiviteilerinin belirlenmesi ve çeşitli analitlerin konsantrasyonlarını izlemesi gibi geniş uygulama seçenekleri sunmaktadır. Ayrıca floresan proteinler farklı olgunlaşma süreleri ile hücre saatler ve zamanlayıcılar olarak da kullanılmaktadır. Bakterilerden memeli hücrelerine kadar çeşitli hücreler tarafından sentezlenebilen floresan proteinler, küçük ve basit yapıları ve farklı teknikler ile kolayca tespit edilebilmeleri farklı uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. Tüm bu avantajlar göz önüne alındığında, farklı biyoteknoloji disiplinleri arasında, özellikle moleküler mikrobiyoloji ve genetik mühendisliğin doğrudan arayüz oluşturduğu akademik çalışmaların FP'ler ile önümüzdeki yıllarda daha fazla etkileşim içerisinde olacağı beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Baehler, P. J., Biondi, R. M., van Bemmelen, M., Véron, M., & Reymond, C. D. (2002). Random insertion of green fluorescent protein into the regulatory subunit of cyclic adenosine monophosphate-dependent protein kinase. *Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.)*, 183. doi:10.1385/1-59259-280-5:057
- Beach, D. L., Salmon, E. D., & Bloom, K. (1999). Localization and anchoring of mRNA in budding yeast. *Current Biology*, 9(11). doi:10.1016/S0960-9822(99)80260-7
- Bertrand, E., Chartrand, P., Schaefer, M., Shenoy, S. M., Singer, R. H., & Long, R. M. (1998). Localization of ASH1 mRNA particles in living yeast. *Molecular Cell*, 2(4). doi:10.1016/S1097-2765(00)80143-4
- Chalfie, M., Tu, Y., Euskirchen, G., Ward, W. W., & Prasher, D. C. (1994). Green fluorescent protein as a marker for gene expression. *Science*, 263(5148). doi:10.1126/science.8303295
- Chudakov, D. M., Belousov, V. V., Zaraisky, A. G., Novoselov, V. V., Staroverov, D. B., Zorov, D. B., ... Lukyanov, K. A. (2003). Kindling fluorescent proteins for precise in vivo photolabeling. *Nature Biotechnology*, 21(2). doi:10.1038/nbt778
- Chudakov, D. M., Matz, M. V., Lukyanov, S., & Lukyanov, K. A. (2010). Fluorescent proteins and their applications in imaging living cells and tissues. *Physiological Reviews*. doi:10.1152/physrev.00038.2009
- Corish, P., & Tyler-Smith, C. (1999). Attenuation of green fluorescent protein half-life in mammalian cells. *Protein Engineering*, 12(12). doi:10.1093/protein/12.12.1035
- Coutard, B., Gagnaire, M., Guilhon, A. A., Berro, M., Canaan, S., & Bignon, C. (2008). Green fluorescent protein and factorial approach: An effective partnership for screening the soluble expression of recombinant proteins in *Escherichia coli*. *Protein Expression and Purification*, 61(2). doi:10.1016/j.pep.2008.05.014
- Daigle, N., & Ellenberg, J. (2007). λ N-GFP: An RNA reporter system for live-cell imaging. *Nature Methods*, 4(8). doi:10.1038/nmeth1065
- Deheyn, D. D., Kubokawa, K., Mccarthy, J. K., Murakami, A., Porrachia, M., Rouse, G. W., & Holland, N. D. (2007). Endogenous green fluorescent protein (GFP) in amphioxus. *Biological Bulletin*, 213(2). doi:10.2307/25066625
- Deliolanis, N. C., Kasmieh, R., Wurdinger, T., Tannous, B. A., Shah, K., & Ntziachristos, V. (2008). Performance of the red-shifted fluorescent proteins in deep-tissue molecular imaging applications. *Journal of Biomedical Optics*, 13(4). doi:10.1117/1.2967184
- Drobizhev, M., Tillo, S., Makarov, N. S., Hughes, T. E., & Rebane, A. (2009). Absolute two-photon absorption spectra and two-photon brightness of orange and red fluorescent proteins. *Journal of Physical Chemistry B*, 113(4). doi:10.1021/jp8087379
- Duncan, R. R., Greaves, J., Wiegand, U. K., Matskevich, I., Bodammer, G., Apps, D. K.,

- ... Chow, R. H. (2003). Functional and spatial segregation of secretory vesicle pools according to vesicle age. *Nature*, 422(6928). doi:10.1038/nature01389
- Fraser, S. T., Hadjantonakis, A. K., Sahr, K. E., Willey, S., Kelly, O. G., Jones, E. A. V., ... Baron, M. H. (2005). Using a histone yellow fluorescent protein fusion for tagging and tracking endothelial cells in ES cells and mice. *Genesis (United States)*, 42(3). doi:10.1002/gene.20139
- Fusco, D., Accornero, N., Lavoie, B., Shenoy, S. M., Blanchard, J. M., Singer, R. H., & Bertrand, E. (2003). Single mRNA molecules demonstrate probabilistic movement in living mammalian cells. *Current Biology*, 13(2). doi:10.1016/S0960-9822(02)01436-7
- Gross, L. A., Baird, G. S., Hoffman, R. C., Baldrige, K. K., & Tsien, R. Y. (2000). The structure of the chromophore within DsRed, a red fluorescent protein from coral. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(22). doi:10.1073/pnas.97.22.11990
- Halin, C., Mora, J. R., Sumen, C., & Von Andrian, U. H. (2005). In vivo imaging of lymphocyte trafficking. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*. doi:10.1146/annurev.cellbio.21.122303.133159
- Henikoff, S., Ahmad, K., Platero, J. S., & Van Steensel, B. (2000). Heterochromatic deposition of centromeric histone H3-like proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(2). doi:10.1073/pnas.97.2.716
- Hirrlinger, P. G., Scheller, A., Braun, C., Quintela-Schneider, M., Fuss, B., Hirrlinger, J., & Kirchhoff, F. (2005). Expression of reef coral fluorescent proteins in the central nervous system of transgenic mice. *Molecular and Cellular Neuroscience*, 30(3). doi:10.1016/j.mcn.2005.08.011
- Hoffman, R. M. (2005). The multiple uses of fluorescent proteins to visualize cancer in vivo. *Nature Reviews Cancer*. doi:10.1038/nrc1717
- Hoffman, R. M. (2008). A better fluorescent protein for whole-body imaging. *Trends in Biotechnology*. doi:10.1016/j.tibtech.2007.10.006
- Hoffman, R. M. (2009). Imaging cancer dynamics in vivo at the tumor and cellular level with fluorescent proteins. *Clinical and Experimental Metastasis*. doi:10.1007/s10585-008-9205-z
- Huisken, J., Swoger, J., Del Bene, F., Wittbrodt, J., & Stelzer, E. H. K. (2004). Optical sectioning deep inside live embryos by selective plane illumination microscopy. *Science*, 305(5686). doi:10.1126/science.1100035
- Jones, J. J., Bridges, A. M., Fosberry, A. P., Gardner, S., Lowers, R. R., Newby, R. R., ... Jenkins, O. (2004). Potential of real-time measurement of GFP-fusion proteins. In *Journal of Biotechnology* (Vol. 109). doi:10.1016/j.jbiotec.2003.10.039
- Kanda, T., Sullivan, K. F., & Wahl, G. M. (1998). Histone-GFP fusion protein enables sensitive analysis of chromosome dynamics in living mammalian cells. *Current Biology*, 8(7). doi:10.1016/S0960-9822(98)70156-3

- Kato, N., & Lam, E. (2001). Detection of chromosomes tagged with green fluorescent protein in live *Arabidopsis thaliana* plants. *Genome Biology*, 2(11).
- König, K. (2000). Multiphoton microscopy in life sciences. *Journal of Microscopy*, 200(Pt 2).
- Kuduğ Ceylan, H., İmamaoğlu, R., Gökçe, İ. (2020). Siyan (mavi) Fluoresan Protein Aquamarine'nin Biyoreaktörde Üretilmesi ve Saflaştırılması. *European Journal of Science and Technology*. doi:10.31590/ejosat.660492
- Kuduğ, H., Atama, B., İmamaoğlu, R., Düzgün, D., Gökçe, İ. (2019). Production of red fluorescent protein (mCherry) in an inducible *E. coli* expression system in a bioreactor, purification and characterization. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 3(1).
- Lange, S., Katayama, Y., Schmid, M., Burkacky, O., Brauchle, C., Lamb, D. C., & Jansen, R. P. (2008). Simultaneous transport of different localized mRNA species revealed by live-cell imaging. *Traffic*, 9(8). doi:10.1111/j.1600-0854.2008.00763.x
- Li, X., Zhao, X., Fang, Y., Jiang, X., Duong, T., Fan, C., Kain, S. R. (1998). Generation of destabilized green fluorescent protein as a transcription reporter. *Journal of Biological Chemistry*, 273(52). doi:10.1074/jbc.273.52.34970
- Lin, M. Z., McKeown, M. R., Ng, H. L., Aguilera, T. A., Shaner, N. C., Campbell, R. E., ... Tsien, R. Y. (2009). Autofluorescent Proteins with Excitation in the Optical Window for Intravital Imaging in Mammals. *Chemistry and Biology*, 16(11). doi:10.1016/j.chembiol.2009.10.009
- Lindhout, B. I., Fransz, P., Tessadori, F., Meckel, T., Hooykaas, P. J. J., & van der Zaal, B. J. (2007). Live cell imaging of repetitive DNA sequences via GFP-tagged polydactyl zinc finger proteins. *Nucleic Acids Research*, 35(16). doi:10.1093/nar/gkm618
- Lippincott-Schwartz, J., Altan-Bonnet, N., & Patterson, G. H. (2003). Photobleaching and photoactivation: Following protein dynamics in living cells. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*.
- Livet, J., Weissman, T. A., Kang, H., Draft, R. W., Lu, J., Bennis, R. A., ... Lichtman, J. W. (2007). Transgenic strategies for combinatorial expression of fluorescent proteins in the nervous system. *Nature*, 450(7166). doi:10.1038/nature06293
- Lukyanov, K. A., Fradkov, A. F., Gurskaya, N. G., Matz, M. V., Labas, Y. A., Savitsky, A. P., ... Lukyanov, S. A. (2000). Natural animal coloration can be determined by a nonfluorescent green fluorescent protein homolog. *Journal of Biological Chemistry*, 275(34). doi:10.1074/jbc.C000338200
- Matz, M. V., Fradkov, A. F., Labas, Y. A., Savitsky, A. P., Zaraisky, A. G., Markelov, M. L., & Lukyanov, S. A. (1999). Fluorescent proteins from nonbioluminescent Anthozoa species. *Nature Biotechnology*, 17(10). doi:10.1038/13657
- Matzke, A. J. M., Huettel, B., Van Der Winden, J., & Matzke, M. (2005). Use of two-color fluorescence-tagged transgenes to study interphase chromosomes in living plants. *Plant Physiology*, 139(4). doi:10.1104/pp.105.071068

- Mempel, T. R., Scimone, M. L., Mora, J. R., & Von Andrian, U. H. (2004). In vivo imaging of leukocyte trafficking in blood vessels and tissues. *Current Opinion in Immunology*. doi:10.1016/j.coi.2004.05.018
- Mirabella, R., Franken, C., Van Der Krogt, G. N. M., Bisseling, T., & Geurts, R. (2004). Use of the fluorescent timer DsRED-E5 as reporter to monitor dynamics of gene activity in plants. *Plant Physiology*, 135(4). doi:10.1104/pp.103.038539
- Miyatsuka, T., Li, Z., & German, M. S. (2009). Chronology of islet differentiation revealed by temporal cell labeling. *Diabetes*, 58(8). doi:10.2337/db09-0390
- Mizuno, H., Mal, T. K., Tong, K. I., Ando, R., Furuta, T., Ikura, M., & Miyawaki, A. (2003). Photo-induced peptide cleavage in the green-to-red conversion of a fluorescent protein. *Molecular Cell*, 12(4). doi:10.1016/S1097-2765(03)00393-9
- Moradpour, D., Evans, M. J., Gosert, R., Yuan, Z., Blum, H. E., Goff, S. P., ... Rice, C. M. (2004). Insertion of Green Fluorescent Protein into Nonstructural Protein 5A Allows Direct Visualization of Functional Hepatitis C Virus Replication Complexes. *Journal of Virology*, 78(14). doi:10.1128/jvi.78.14.7400-7409.2004
- Nyqvist, D., Mattsson, G., Köhler, M., Lev-Ram, V., Andersson, A., Carlsson, P. O., ... Jansson, L. (2005). Pancreatic islet function in a transgenic mouse expressing fluorescent protein. *Journal of Endocrinology*, 186(2). doi:10.1677/joe.1.06204
- Palmer, A. E., Giacomello, M., Kortemme, T., Hires, S. A., Lev-Ram, V., Baker, D., & Tsien, R. Y. (2006). Ca²⁺ Indicators Based on Computationally Redesigned Calmodulin-Peptide Pairs. *Chemistry and Biology*, 13(5). doi:10.1016/j.chembiol.2006.03.007
- Passamaneck, Y. J., Di Gregorio, A., Papaioannou, V. E., & Hadjantonakis, A. K. (2006). Live imaging of fluorescent proteins in chordate embryos: From ascidians to mice. *Microscopy Research and Technique*. doi:10.1002/jemt.20284
- Phair, R. D., & Misteli, T. (2000). High mobility of proteins in the mammalian cell nucleus. *Nature*, 404(6778). doi:10.1038/35007077
- Plautz, J. D., Day, R. N., Dailey, G. M., Welsh, S. B., Hall, J. C., Halpain, S., & Kay, S. A. (1996). *Green fluorescent protein and its derivatives as versatile markers for gene expression in living Drosophila melanogaster, plant and mammalian cells*. In *Gene* (Vol. 173). doi:10.1016/0378-1119(95)00700-8
- Prasher, D. C., Eckenrode, V. K., Ward, W. W., Prendergast, F. G., & Cormier, M. J. (1992). Primary structure of the *Aequorea victoria* green-fluorescent protein. *Gene*, 111(2). doi:10.1016/0378-1119(92)90691-H
- Querido, E., & Chartrand, P. (2008). Using Fluorescent Proteins to Study mRNA Trafficking in Living Cells. *Methods in Cell Biology*. doi:10.1016/S0091-679X(08)85012-1
- Razansky, D., Distel, M., Vinegoni, C., Ma, R., Perrimon, N., Köster, R. W., & Ntziachristos, V. (2009). Multispectral opto-acoustic tomography of deep-seated fluorescent proteins in vivo. *Nature Photonics*, 3(7). doi:10.1038/nphoton.2009.98
- Robinett, C. C., Straight, A., Li, G., Wilhelm, C., Sudlow, G., Murray, A., & Belmont, A.

- S. (1996). In vivo localization of DNA sequences and visualization of large-scale chromatin organization using lac operator/repressor recognition. *Journal of Cell Biology*, 135(6 II). doi:10.1083/jcb.135.6.1685
- Rodriguez, A. J., Condeelis, J., Singer, R. H., & Dichtenberg, J. B. (2007). Imaging mRNA movement from transcription sites to translation sites. *Seminars in Cell and Developmental Biology*. doi:10.1016/j.semcdb.2007.02.002
- Roth, A. H. F. J., & Dersch, P. (2010). A novel expression system for intracellular production and purification of recombinant affinity-tagged proteins in *Aspergillus niger*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86(2). doi:10.1007/s00253-009-2252-9
- Sakaue-Sawano, A., Kurokawa, H., Morimura, T., Hanyu, A., Hama, H., Osawa, H., ... Miyawaki, A. (2008). Visualizing Spatiotemporal Dynamics of Multicellular Cell-Cycle Progression. *Cell*, 132(3). doi:10.1016/j.cell.2007.12.033
- Sevastyanovich, Y., Alfasi, S., Overton, T., Hall, R., Jones, J., Hewitt, C., & Cole, J. (2009). Exploitation of GFP fusion proteins and stress avoidance as a generic strategy for the production of high-quality recombinant proteins. *FEMS Microbiology Letters*, 299(1). doi:10.1111/j.1574-6968.2009.01738.x
- Shagin, D. A., Barsova, E. V., Yanushevich, Y. G., Fradkov, A. F., Lukyanov, K. A., Labas, Y. A., ... Matz, M. V. (2004). GFP-like Proteins as Ubiquitous Metazoan Superfamily: Evolution of Functional Features and Structural Complexity. *Molecular Biology and Evolution*, 21(5). doi:10.1093/molbev/msh079
- Shaner, N. C., Patterson, G. H., & Davidson, M. W. (2007). Advances in fluorescent protein technology. *Journal of Cell Science*. doi:10.1242/jcs.005801
- Shcherbo, D., Merzlyak, E. M., Chepurnykh, T. V., Fradkov, A. F., Ermakova, G. V., Solovieva, E. A., ... Chudakov, D. M. (2007). Bright far-red fluorescent protein for whole-body imaging. *Nature Methods*, 4(9). doi:10.1038/nmeth1083
- Shimomura, O., Johnson, F. H., & Saiga, Y. (1962). Extraction, Purification and Properties of Aequorin, a Bioluminescent Protein from the Luminous Hydro-medusan, *Aequorea*. *Journal of Cellular and Comparative Physiology*, 59(3). doi:10.1002/jcp.1030590302
- Shu, X., Royant, A., Lin, M. Z., Aguilera, T. A., Lev-Ram, V., Steinbach, P. A., & Tsien, R. Y. (2009). Mammalian expression of infrared fluorescent proteins engineered from a bacterial phytochrome. *Science*, 324(5928). doi:10.1126/science.1168683
- Solimena, M., & Gerdes, H. H. (2003). Secretory granules: And the last shall be first... *Trends in Cell Biology*. doi:10.1016/S0962-8924(03)00150-8
- Subach, F. V., Subach, O. M., Gundorov, I. S., Morozova, K. S., Piatkevich, K. D., Cervero, A. M., & Verkhusha, V. V. (2009). Monomeric fluorescent timers that change color from blue to red report on cellular trafficking. *Nature Chemical Biology*, 5(2). doi:10.1038/nchembio.138
- Sugita, M., & Shiba, Y. (2005). Neuroscience: Genetic tracing shows segregation of

- taste neuronal circuitries for bitter and sweet. *Science*, 309(5735). doi:10.1126/science.1110787
- Teng, M., Li, Z., Zhou, Y., Zhang, Z., Miao, L., Bai, X., Wang, S. (2023). Real-Time Monitoring of CAR-T Cell Efficiency through a Biorthogonal Cycloaddition Labeling Strategy. *Bioconjugate Chemistry*, 34(2). doi:10.1021/acs.bioconjchem.3c00006
- Terskikh, A., Fradkov, A., Ermakova, G., Zaraisky, A., Tan, P., Kajava, A. V., Siebert, P. (2000). 'Fluorescent timer': Protein that changes color with time. *Science*, 290(5496). doi:10.1126/science.290.5496.1585
- Turchin, I. V., Kamensky, V. A., Plehanov, V. I., Orlova, A. G., Kleshnin, M. S., Fiks, I. I., ... Savitsky, A. P. (2008). Fluorescence diffuse tomography for detection of red fluorescent protein expressed tumors in small animals. *Journal of Biomedical Optics*, 13(4). doi:10.1117/1.2953528
- VanEngelenburg, S. B., & Palmer, A. E. (2008). Fluorescent biosensors of protein function. *Current Opinion in Chemical Biology*. doi:10.1016/j.cbpa.2008.01.020
- Verkhusha, V. V., Chudakov, D. M., Gurskaya, N. G., Lukyanov, S., & Lukyanov, K. A. (2004). Common pathway for the red chromophore formation in fluorescent proteins and chromoproteins. *Chemistry and Biology*, 11(6). doi:10.1016/j.chembiol.2004.04.007
- Vincent, P., Maskos, U., Charvet, I., Bourgeais, L., Stoppini, L., Leresche, N., ... Paupardin-Tritsch, D. (2006). Live imaging of neural structure and function by fibred fluorescence microscopy. *EMBO Reports*, 7(11). doi:10.1038/sj.embor.7400801
- Wang, F., Dennis, J. E., Awadallah, A., Solchaga, L. A., Molter, J., Kuang, Y., ... Lee, Z. (2009). Transcriptional profiling of human mesenchymal stem cells transduced with reporter genes for imaging. *Physiological Genomics*, 37(1). doi:10.1152/physiolgenomics.00300.2007
- Wang, S., & Hazelrigg, T. (1994). Implications for bcd mRNA localization from spatial distribution of exu protein in *Drosophila* oogenesis. *Nature*, 369(6479). doi:10.1038/369400a0
- Wang, X., Pang, Y., Ku, G., Xie, X., Stoica, G., & Wang, L. V. (2003). Noninvasive laser-induced photoacoustic tomography for structural and functional in vivo imaging of the brain. *Nature Biotechnology*, 21(7). doi:10.1038/nbt839
- Yang, M., Baranov, E., Jiang, P., Sun, F. X., Li, X. M., Li, L., ... Hoffman, R. M. (2000). Whole-body optical imaging of green fluorescent protein-expressing tumors and metastases. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(3). doi:10.1073/pnas.97.3.1206
- Young, P., & Feng, G. (2004). Labeling neurons in vivo for morphological and functional studies. *Current Opinion in Neurobiology*. doi:10.1016/j.conb.2004.08.007
- Yu, Y. A., Shabahang, S., Timiryasova, T. M., Zhang, Q., Beltz, R., Gentschev, I., ... Szalay, A. A. (2004). Visualization of tumors and metastases in live animals with bacteria and vaccinia virus encoding light-emitting proteins. *Nature Bio-*

technology, 22(3). doi:10.1038/nbt937

Zheng, L., Lin, Z., Fan, H., Chen, M., Yu, J., Miao, Y., & Wu, B. (2022). A fluorescent screening method for optimization of conotoxin expression in *Pichia pastoris*. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 69(4). doi:10.1002/bab.2231

Zhu, D., Wang, Z., Xu, Y., Lin, J., Qiu, M., Liu, J., & Li, X. (2022). Novel application of anti-human Fc nanobody for screening high-producing CHO cells for monoclonal antibody. *Engineering in Life Sciences*, 22(10). doi:10.1002/elsc.202200028

Bölüm 12

MAGNETRON PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN SERAMİK FİLMLER

Mevra ASLAN ÇAKIR¹



¹ Dr. Öğr. Üyesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Makine Mühendisliği
Bölümü, maslan@erzincan.edu.tr, Orcid: 0000-0002-3826-8390.

Giriş

Magnetron püskürtme, hem laboratuvar hem de endüstriyel ölçeklerde yaygın olarak kullanılan klasik bir ince film hazırlama teknolojisidir (Wang & Wu, 2022). Magnetron püskürtme yöntemi metalleri, alaşımları ve bileşikleri çok çeşitli malzemeler üzerine biriktirmek için kullanılmaktadır. Bu yöntemde malzeme yüzeyine biriktirilmek istenen bir hedef veya bir metal öncüsü, inert gazların enerjik iyonları ile bombardımana tutulmaktadır. Bu enerjik iyonların hedefle şiddetli çarpışması, hedef metal atomlarını uzaya fırlatır. Bu metal atomları daha sonra metalik bir film oluşturan taban malzeme üzerinde biriktirilir (Tiwari, 2017). Magnetron püskürtme teknolojisi ile hazırlanan bir film; iyi yapışma, iyi tekrarlanabilirlik, yüksek büyüme hızı, düzgün ve yoğun yüzey özelliklerine sahiptir. Magnetron püskürtme, son on yılda hızla gelişerek endüstriyel açıdan önemli ve çok çeşitli kaplamaların biriktirilmesi için tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Çoğu durumda, magnetron püskürtmeli filmler, diğer fiziksel buhar biriktirme (PVD) işlemleriyle bırakılan filmlerden daha iyi performans göstermekte ve diğer yüzey kaplama teknikleri ile üretilen çok daha kalın filmlerle aynı işlevselliği sunabilmektedir (Rossnagel, Sproul & Legg, 1995; Kelly, & Arnell, 2000; Anders, 2017). Üstelik bu teknoloji hızla gelişmekte olup, alet ve kalıplar üzerine sert filmler, uçak veya otomobil parçaları vb. üzerine aşınmaya dayanıklı filmler, biyomedikal implant malzemeleri üzerine hem aşınmaya hem de korozyona dayanıklı filmler kaplamak için birçok alanda kullanılmaktadır (Chauhan & Rawal, 2014). Aşınmaya ve korozyona dayanıklı kaplamalar içerisinde metaller üzerine en çok kullanılan kaplama türlerinden biri seramik kaplamalardır (Umashanker & ark., 2021). Seramik kaplamalar, alt tabakanın korozyon önleyici, aşınma direnci, ısıl direnç, sürtünme vb. özelliklerini iyileştiren özel bir tabaka sunmak için metalik malzemeler üzerine uygulanır. Metalik alt tabakaları seramik kaplamalarla süslemek için literatürde bildirilen birçok kaplama türü ve imalat yöntemi vardır. Seramik malzemeler genel olarak bileşimlerine göre oksit ve oksit olmayan seramik malzemeler olarak iki kategoriye ayrılır. Seramik malzemelerin çoğu, imalat için kullanılan oksit seramik kategorisindedir (Bhamare & Kulkarni, 2023). Oksit türü seramik filmlerin üretimi için sol-jel (Zhang & ark., 2023), mikro ark oksidasyon (Chen & ark., 2023), elektroforetik biriktirme (EPD) (Abdullah, Adnan, & Anae, 2022), atomik katman biriktirme (ALD) (Seo & ark., 2023), plazma yüzey işlemleri (Gim, Kim & Choi, 2023), elektrokimyasal kaplama (Mehrvarez & ark., 2022), lazer kaplama (Liu & ark., 2023), fiziksel buhar biriktirme (PVD)(Liu & ark., 2023), kimyasal buhar biriktirme (CVD)(Bai & ark., 2022) ve magnetron püskürtme (Khairy & ark., 2023) yöntemleri vb. kullanılmaktadır (Tablo 1). Metallerin aşınma özelliklerini iyileştirmek amacıyla magnetron püskürtme yöntemi ile elde edilen seramik filmler ile ilgili yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmektedir:

Yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, çeşitli Al içeriğine sahip V-Al-N filmleri reaktif magnetron sistemi ile biriktirilmiş ve Al içeriğinin V-Al-N filmlerinin mikro yapısı, oksidasyon direnci, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelemiştirlerdir. Al içeriği atomik ağırlıkça %4,7'nin altında olduğunda, oda sıcaklığında sürtünme katsayısı (μ) ve aşınma oranında karşılık gelen bir düşüşle sertlikte bir artış olmuş ve artan Al içeriği, kırılma tokluğu düşürürken oksidasyon direncini iyileştirmiştir (Ju & ark., 2018). CrN filmler, doğru akım (DC) magnetron püskürtme biriktirme tekniği kullanılarak oksinitrürleme ile işlenmiş AISI H13 alaşımlı çelik üzerine kaplanmışlardır. CrN film biriktirme süresi değiştirilirken, püskürtme parametreleri -25V sabit öngerilim, 100W güç, sırasıyla 45 ve 30 sccm Ar ve N₂ gaz akış hızı ve 300°C biriktirme sıcaklığı ile sabit tutulmuştur. Sonuç olarak CrN/oksinitrürleme dubleks yüzey işlemi, oksinitrürlenmiş AISI H13 alaşımlı çeliğin özelliklerini iyileştirmede etkilidir (Chang & ark., 2018). Esnek indiyum kalay oksit/polietilen tereftalat taban malzemeler üzerinde yaklaşık 40°C'de DC magnetron püskürtme yöntemiyle tungsten oksit (WO₃) filmler hazırlanmışlardır. Püskürtme basıncının filmlerin mikroyapısı, morfolojisi ve elektrokromik özellikleri üzerindeki etkileri Raman spektroskopisi, taramalı elektron mikroskobu, X-ışını difraktometresi, atomik kuvvet mikroskobu ve elektrokimyasal teknikler kullanılarak incelemiştirlerdir. Hazırlanan WO₃ esnek filmler, mükemmel elektrokromik özellikler sergilemiş ve DC magnetron püskürtme basıncını kontrol ederek özel uygulamalar için hazırlanabileceği sonucuna varılmıştır (Ma & ark., 2023). AISI52100 çelik yüzeyleri, magnetron püskürtme yöntemiyle toplam 65 ve 120 nm kalınlığında çift katmanlı Cr-N/TiB₂ ince filmler ile kaplanmışlardır. CrN/TiB₂ ince filmleri 10 ve 20 sccm N₂ akışı altında biriktirilirken, Cr/TiB₂ ince filmi için N₂ akışı kullanmamıştır. Metalik (Cr)/seramik (TiB₂) ve seramik (CrN)/seramik (TiB₂) katmanlarından oluşan bu çift katmanlı ince filmlerin sürtünme ve aşınma davranışları tribometre testleri ile incelemiştirlerdir. Sonuçta yüksek N₂ akışında yüksek kalınlık ve sertliğe sahip CrN/TiB₂ ince filmi ile en iyi tribolojik davranışı gösterdiği bulunmuştur (Özkan, 2020). AlCrTiN kaplamalar, radyo frekansı (RF) magnetron püskürtme ile alüminyum-silikon alaşımlı alt tabakalar (A4032) üzerine biriktirilmiştir. Nitrojen akışının sertlik, aşınma direnci ve yapışma üzerindeki etkisi araştırılmış ve numunelerin mikro yapısı ile ilişkilendirilmiştir. Alüminyum-silikon alaşımı üzerindeki AlCrTiN kaplamaların mekanik özellikleri, endüstriyel uygulamalar için daha iyi sertlik (yaklaşık 10,5 GPa), gelişmiş aşınma direnci (COF ~0,3) ve artan kırılma tokluğu davranışı göstermiştir (Orjuela & ark., 2023).

Tablo 1. Son yıllarda literatürde çalışılmış bazı oksit seramik filmlerin; üretim teknikleri ile farklı taban malzemelere uygulama sonrası elde edilen kaplama filmleri

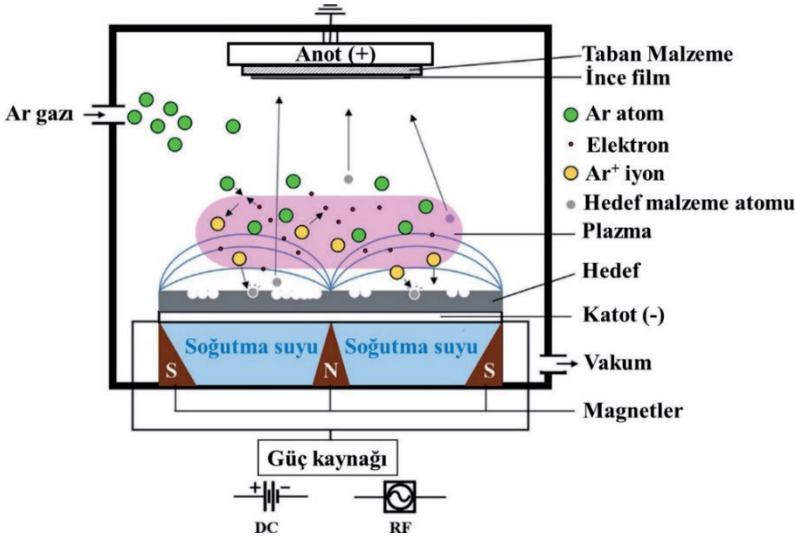
Üretim Yöntemi	Taban Malzeme	Kaplama filmi	Referans
Sol-Jel	Kuvars	Al katkılı çinko oksit (ZnO)	(Zhang & ark., 2023)
Mikro Ark Oksidasyon	2024 Alüminyum (Al) Alaşımı	CoAl ₂ O ₄ , α-Al ₂ O ₃	(Chen & ark., 2023)
Elektroforetik biriktirme (EPD)	AISI 316L paslanmaz çelik	CaO	(Abdullah, Adnan, & Anaee, 2022)
Atomik Katman Biriktirme (ALD)	Safir	LiNiO ₂	(Seo & ark., 2023)
Plazma Yüzey İşlemleri	Titanyum	TiO ₂ /SiO ₂	(Gim, Kim & Choi, 2023)
Elektrokimyasal Kaplama	Ni-Ti alaşımı	Hidroksiapatit/ZnO	(Mehrvarz & ark., 2022)
Lazer Kaplama	Ti6Al4V	Grafen oksit (GO) katkılı TiN	(Liu & ark., 2023)
Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)	Ni bazlı süper alaşım (NiCoCrAlYHf)	Lantan zirkonat (La ₂ Zr ₂ O ₇)	(Liu & ark., 2023)
Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)	Seramik	ZnO/SnO ₂	(Bai & ark., 2022)
Magnetron Püskürtme	Cam	Vanadyum dioksit (VO ₂)	(Khairy & ark., 2023)

1. MAGNETRON PÜSKÜRTME

Temel püskürtme işleminde, bir hedef (veya katot) plakası, hedefin önünde bulunan bir ışıltılı deşarj plazmasında üretilen enerji yüklü iyonlar tarafından bombardımana tutulur. Bombardıman işlemi, daha sonra ince bir film olarak bir taban malzeme üzerinde yoğunlaşabilen hedef atomların çıkarılmasına, yani püskürtülmesine neden olur. İyon bombardımanı sonucunda hedef yüzeyinden ikincil elektronlar da yayılır ve bu elektronlar plazmanın korunmasında önemli bir rol oynar (Kelly & Arnell, 2000). Magnetron püskürtme yöntemi ise, bir di-yot püskürtme hedefine uygulanan özel olarak oluşturulmuş bir manyetik alan kullanılarak, metaller ve seramiklerde dahil olmak üzere birçok malzeme türünün, çok sayıda altlık malzemesi türü üzerine biriktirilmesine izin veren yüksek oranlı bir vakum kaplama tekniğidir (Juhasz & Best, 2011). Magnetron püskürtme yönteminde oluşturulan deşarjının belirgin bir özelliği, ikincil elektronları kato-da yakın bir bölgede sınırlamaya hizmet eden, genellikle 10²-10³ Gauss aralığında bir alan gücüne sahip bir manyetik alanın uygulanmasıdır. Dolayısıyla bu küçük bölgedeki kapalı elektron kayması, nispeten yüksek bir plazma yoğunluğuna yol açabilir. Manyetik alan boyunca sınırlı elektron hareketliliği koşulu altında, her bir manyetik alan çizgisi aynı zamanda elektrik alanının neredeyse eş potansiyel çizgisidir. Elektrik potansiyeli manyetik alan boyunca zorla değişir, dolayısıyla manyetik alana dik yön boyunca güçlü bir elektrik alanı gelişerek pozitif yüklü türleri hedefe doğru hızlandırır. Hedef yüzeye sıçrayan atomik veya moleküler türler genellikle birkaç elektronvoltluk kinetik enerjiye sahiptir ve film büyümesinin gerçekleştiği alt tabakaya doğru hareket ederler (Cao, 2011; Baranov & ark., 2010). Püskürtme işleminde, DC gücünün kullanılabileceği saf metallere RF gücü veya darbeleri DC gerektiren yarı iletkenler ve izolatlara kadar, hedef malzemelerin türünde nere-

deyse hiçbir kısıtlama yoktur. Biriktirme, tek veya çok elementli hedeflerle reaktif olmayan (yalnızca inert gaz) veya reaktif (inert ve reaktif gaz) deşarj- larla gerçekleştirilebilir (Tudose & ark., 2019).

Magnetron püskürtmenin diğer iyon kaplama teknolojilerine göre birçok avantajı vardır. Bu avantajlar: yoğun bir yapı (katodik ark iyon kaplama ile karşılaştırıldığında); büyük boyutlu imalat parçaları için yararlı olan oldukça büyük bir püskürtme alanı; çoğu malzeme için, püskürtme hedefleri haline getirilebildikleri sürece kaplanabilmeleri; kaplamanın kalınlığı doğru bir şekilde kontrol edilebilmesi; ince filmin parçacık boyutu ve parametre koşulları değiştirilerek kontrol edilebilmesi; film ve taban malzeme arasında iyi bir arayüzey yapışması için yüksek enerjili atomlar ve kompaktlıktır (Wang & Wu, 2022; Huang & ark., 2021).



Şekil 1. Magnetron püskürtme yönteminin şematik gösterimi (Hishimone, Nagai & Sato, 2020)

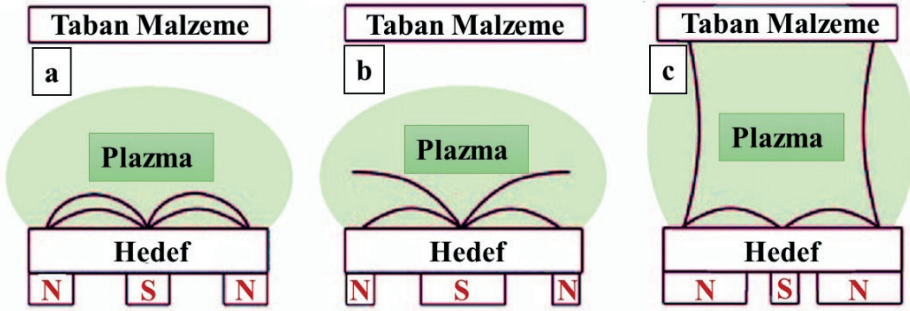
Magnetron Püskürtme Konfigürasyonları

Düzlemsel magnetron püskürtme deşarji hem metalik hem de dielektrik malzemelerin ince filmlerinin biriktirilmesi için iyi bir şekilde kurulmuştur. Hem laboratuvar ortamlarında (küçük dairesel hedefler kullanılarak) hem de hedeflerin genellikle doğrusal (dikdörtgen ve daha büyük) olduğu endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Magnetron püskürtme yöntemi uygulama alanına bağlı olarak sistemdeki hedefe sabit voltaj (DC), radyo frekansı (RF) veya darbeli olabilir. Konfigürasyon düzlemsel, aksel manyetik alana sahip silindirik veya sabit bir manyetik düzeneğin etrafında dönen olabilmektedir. Bununla birlikte, bunlar, elektronları katot hedefinin yakınında manyetik olarak sınırlamak için aynı prensibin yalnızca geometrik varyantlarıdır.

Çeşitli konfigürasyonlar sayesinde, magnetron püskürtme tekniği, çeşitli form ve şekillerde bir dizi alt tabaka üzerine yerleştirilebilen ve çok geniş alanlara kolayca ölçeklenebilen çok çeşitli malzemelere uygulanabilir (Hishimone, Nagai & Sato, 2020; Lundin, Minea, & Gudmundsson, 2019; Gudmundsson, 2020).

Dengeli-dengesiz Magnetron Püskürtme

Tüm mıknatıslar aynı güce sahipse, dış mıknatıslardan çıkan tüm alan çizgileri merkezi mıknatıstan geçer. Konvansiyonel düzlemsel magnetron püskürtme deşarjının, manyetik akıların dış kutupların kutup yüzlerinden ve kutup boyunca geçmesi durumunda dengeli olduğu kabul edilir. Sonuç olarak plazmanın sadece katot çevresinde kaldığı bu konfigürasyona dengeli magnetron püskürtme adı verilir (Şekil 2a).



Şekil 2. Belirtilen manyetik alan çizgileri ile üç farklı düzlemsel magnetron konfigürasyonunun şeması. a) dengeli magnetron püskürtme, b) dengesiz tip 1 püskürtme ve c) dengesiz tip 2 püskürtme (Fager, 2014)

Dengesiz magnetron, katot boyunca bir kutupta akı konsantrasyonuna sahip bir alan veren bir manyetik devre yapısına sahiptir, böylece bazı alan çizgileri bu kutup parçalarını birleştirmez, ancak katottan uzağa yönlendirilen yüzeyden daha uzakta bir alan yaratarak sistem etrafında yönlendirilirler. Yüzeye paralel olan düzlemsel magnetron alanında hapsolan elektronlar bu dengesiz alana dağılabilir ve alt tabakaya doğru yönlendirilebilir. Magnetron düzenlemesinin bu durumu dengesiz magnetron püskürtme olarak adlandırılır (Howson & Ja'fer, 1992). Dengesiz magnetron, merkezi mıknatısın halka mıknatıstan daha güçlü olduğu başka bir konfigürasyonda (tip 1) kullanılabilir (Şekil 2b). Aksine, tip 2 için, merkezi mıknatısın artık indüksiyonu dış mıknatısındaki kadar güçlü değildir. Dengesiz tip 2 durumunda, merkez ve dış mıknatıslar arasındaki tüm alan çizgileri kapalı değildir, ancak bazıları alt tabakaya doğru yönlendirilir ve bazı ikincil elektronlar bu alan çizgilerini takip edebilir. Sonuç olarak, plazma artık hedef bölgede güçlü bir şekilde sınırlı değildir, aynı zamanda alt tabakaya doğru da akar (Şekil 2c) (Chaiyakun, Phae-Ngam & Prathumsit, 2020).

Radyo Frekans (RF) Magnetron Püskürtme Tekniği

RF püskürtme, belirli türdeki püskürtme hedef malzemeleri üzerinde yük birikmesini önlemek için vakum ortamındaki akımın elektrik potansiyelini radyo frekanslarda değiştirmeyi içeren bir tekniktir. Elektrik potansiyelini RF püskürtme ile değiştirerek, hedef malzemenin yüzeyi her döngüde birikmiş yükten temizlenebilir. Pozitif döngüde, elektronlar hedef malzeme veya katoda çekilerek ona negatif bir öngerilim verir. Döngünün RF'de meydana gelen negatif kısmında, püskürtülecek hedefin iyon bombardımanı devam eder. Bir DC sıçratma sistemi -2 ile -5 kV arasında voltaj gerektirirken, RF sıçratma dielektrik izolatörleri sıçratmak için yaklaşık 1012 kV gerektirir. RF sıçratmada, taban malzeme ile hedef arasındaki boşlukta (elektrotlar arası boşluk) bulunan elektronlar, iyonlaşmaya neden olmak için RF alanından yeterli enerji almazlar. Ancak, RF alanına paralel bir manyetik alan uygularsak, elektronları akışta kaybolmadan sınırlayacak ve böylece RF deşarj verimliliğini artıracaktır. Bu nedenle, RF püskürtme için bir manyetik alan DC püskürtmeden daha önemlidir (Tripathi & Ridhi, 2023).

İnce film biriktirme açısından, DC püskürtme, yalıtkan hedefleri püskürtmek için etkili bir araç değildir. Bunun nedeni, gelen pozitif iyonları iten hedef yüzeyde pozitif yükün birikmesidir. Bu durumda, negatif yüzey voltajı, akkor deşarjı sürdürmek için gereken voltajdan daha düşük olur. Sonuç olarak, plazma 1 mikrosaniye gibi küçük bir zaman aralığında kapanacaktır (Ohring, 2001). Alternatif olarak, püskürtme işlemine devam etmek için plazmadaki elektronlarla pozitif yüzey yüklerini periyodik olarak nötralize etmek için yüksek frekanslı bir alternatif voltaj kullanılabilir. Bu, RF voltajını kapasitif olarak yalıtıcı hedefe ve plazmaya bağlayarak yapılabilir. Sürekli plazma deşarjını sürdürmek için RF frekansının sistemin etkili RC (devre direnci (R) ve devre kapasitansı (C)) zaman sabitinden daha yüksek olması gerekir. Bu, anahtarlama aralığının, pozitif iyonların kılıfın kenarından yalıtkan yüzeyine gitmesi için gereken süreden daha kısa olması gerektiği anlamına gelir. İzolatörlerin RF deşarjı kullanılarak püskürtülmesindeki ilk önemli gelişme 1962 yılında tarafından rapor edilmiştir (Anderson, Mayer & Wehner, 1962). Bu çalışma, Wehner'in bir triyot püskürtmede bir yalıtkanı temizlemek için RF kullanma ve yalıtkan filmlerin biriktirilmesinde olası RF uygulamasına ilişkin önerilerinden esinlenmiştir (Maisel, Glang & Budenstein, 1971 Bishop, 2011). Metallerin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla RF magnetron püskürtme yöntemi ile elde edilen seramik kaplama filmleri ile ilgili yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmektedir:

RF magnetron püskürtme, aşırı ısı oluşumu ve malzemelerin genel özelliklerini değiştirmeden biyomedikal implantlar gibi herhangi bir malzemenin yüzeyinde ince film kaplamaları büyütme için uygulanabilirliği olan ayırt edici bir biriktirme işlemidir. Çeşitli püskürtme proses parametreleri altında biyomedikal implantlardan biri olan Ti6Al4V alaşımı üzerinde %99,5

saflıkta bir nanoyapılı titanyum karbür (TiC) hedefi etkili bir şekilde yüzeye biriktirmişlerdir. Tüm ince film kaplamaları (200) düzlemine doğru yönlendirilmiştir. Tane boyutları hesaplamalarından, daha yüksek işlem parametrelerinde (RF gücü ve sıcaklık) üretilen numunelerin en küçük tane boyutlarını sergilediği görülmüştür. Daha yüksek işlem parametrelerinde hazırlanan tüm numuneler gelişmiş bir mekanik dayanım göstermiştir (Baruwa & ark., 2021). TaNbSiZrCr karbür kaplamaları 0 ve 23 sccm arasında değişen C_2H_2 akış hızları ile RF dengersiz magnetron püskürtme ile tungsten karbür taban malzemeleri üzerine biriktirilmişlerdir. Kaplamaların mikroyapısı, mekanik özellikleri, tribolojik özellikleri ve korozyon önleyici direnci hem püskürtmeli durumda hem de tavllanmış durumda analiz edilmiştir. Maksimum C_2H_2 akış hızıyla (23 sccm) biriktirilen püskürtmeli numune, püskürtmeli tüm numuneler arasında en iyi tribolojik özellikleri göstermiştir. Ancak tavlama sonrası kaplamanın aşınma oranı yaklaşık 10 kat artmıştır. Tavllanmış kaplama, tüm kaplamalar arasında en yüksek korozyon direnci sergilemiştir (Kao & ark., 2021). Alüminyum bir hedefle reaktif RF magnetron püskürtme yoluyla bakır altlıklar üzerine biriktirilen alüminyum oksit ince filmlerin özellikleri üzerindeki biriktirme parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Taban basıncı ve argon akış hızı, sırasıyla 8 mTorr ve 10 sccm'de sabitlenmiştir. Güç yoğunluğu $15 W/cm^2$ ve oksijen akış hızı 3 sccm olduğunda mükemmel bir alüminyum oksit kaplama elde edildiği görülmüştür. RF gücündeki bir artış, biriken filmde yoğun bir kristal yapıya yol açmıştır. 3 sccm'den yüksek oksijen akış hızında, ince filmlerin gözenekli yapısına neden olduğu sonucuna varılmıştır (Chiang & Chang, 2005).

Tungsten trioksit (WO_3) filmi ile RF magnetron püskürtme işlemi sırasında Ar gazının basıncına göre elektro-optik özelliklerini incelemiştir. Püskürtme süresi, farklı Ar basınçlarında aynı WO_3 film kalınlığına sahip olmak için bir kalınlık/oran monitörü ile ölçülürken kontrol edilmiş ve püskürtme odasındaki argon çalışma gazı basıncı sırasıyla 5, 10 ve 15 mTorr olarak değiştirilmiştir. WO_3 filminin biriktirme hızı, Ar gazı basıncı 5 mTorr için 14 nm/dk, ardından basınç 15 mTorr'a yükseltildikten sonra biriktirme hızı 8,6 nm/dk olarak bulunmuştur. Püskürtme basıncı 15 mTorr'a yükseltildiğinde 15mTorr'daki elektrokromik cihaz, %55'lik daha yüksek optik modülasyonu gösterdiği görülmüştür (Pooyodying & ark., 2022). Rutil TiO_2 ince filmleri, bir argon/oksijen gazı karışımı içinde bir titanyum hedeften reaktif bir RF magnetron püskürtme sistemi ile biriktirmişlerdir. Oda sıcaklığında herhangi bir altlık ön gerilimi uygulamadan RF magnetron püskürtme ile silisyum altlıklar üzerinde düzgün yüzeyli, kristalimsi ve homojen TiO_2 ince filmler elde etmenin mümkün olduğu bulunmuştur (Simionescu & ark., 2019). Çelik numuneler üzerinde RF magnetron püskürtme yöntemi ile biriktirilen $TiAlN$ 'nin mekanik özellikleri incelemiştir. Biriktirilen filmin mikro yapıları ve nano tanecikleri sayesinde, bu nanofilmler çelik taban mal-

zeme yüzeyinin mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Biriktirilen ince film, aşınma direncini %80 oranında ve sertliği %95 oranında iyileştirmiştir (Natarayan & ark., 2021).

Titanyum dioksit (TiO_2) ince filmler, atık su arıtımı, fotokatalitik bozunma aktivitesi, su ayrıştırma, antibakteriyel ve ayrıca biyomedikal uygulamalar gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. TiO_2 filmlerin özellikleri yapı, bileşim ve kristallik, alt tabaka tipi, püskürtme gücü, alt tabaka ile hedef arasındaki mesafe, çalışma basıncı, argon/oksijen oranı, biriktirme süresi, alt tabaka sıcaklığı, katkı maddesi tiplerinden önemli ölçüde etkilenir (Wang & ark., 2020). TiO_2 ince filmleri, oksijen radikalleri kullanılarak reaktif RF magnetron püskürtme ile MgO taban malzemesi üzerine biriktirmişlerdir. Taban malzeme ile Ti-metal hedefi arasındaki mesafe 90 mm olduğunda ve taban malzeme sıcaklığı 125°C 'de tutulduğunda, radikal ışınlanmış TiO_2 filmi, rutil yapıya sahip (110) kafes yapısında bir yönelim sergilemiştir. 300°C 'de hazırlanan radikal ışınlanmış TiO_2 ince filmin kristal yapısı, taban malzeme ile Ti-metal hedef mesafesinin ayarlanmasıyla rutilden anataz yapısına değişmiştir. TiO_2 rutil ve anataz ince filmleri çok düzgün yüzeyli küçük tanelerden oluştuğu belirlenmiştir (Ogawa & ark., 2008). (TiVCrNbSiTaBY) N yüksek entropi alaşımlı nitrür kaplamaları RF magnetron püskürtme ile Si (100) ve sementite karbür alt tabakalar üzerine biriktirmişlerdir. Belirli bir öngerilim voltajında biriktirilen kaplama filmi 32,2 GPa gibi yüksek bir sertlik sergilemiştir. Sürtünme katsayısı, kaplamaların yüzey pürüzlülüğünün değişiminden önemli ölçüde etkilenmiştir. Düşük öngerilim voltajı olmadan ve bu voltajda bırakılan kaplama için tribolojik testler, kaplamaların aşınma davranışının şiddetli abrazyon aşınma ve adeziv aşınma olduğunu, yüksek öngerilim voltajında ise hafif abrazyon aşınma olduğunu göstermiştir (Zhang & ark., 2022). Mekanik ve tribolojik performansını iyileştirmek için ikili nitrür oluşturmak üzere nitrojen (N) ve saf vanadyum ile birleştirilmiş ve oluşturulan vanadyum nitrit (VN) kaplamaların yapısı üzerindeki nitrojenin etkisini değerlendirmek için XPS, XRD, SEM, AFM ve optik profilometre teknikleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, N_2 akış hızının artmasıyla N/V oranının arttığını, biriktirme hızının ise azaldığını göstermiştir. Nitrojen ilavesi, sütunlu bir morfoloji ve ince yüzey pürüzlülüğü ile ince bir yapı ile sonuçlanmıştır. %49,5 oranında nitrojen içeren VN ince filmi en iyi performansı gösterdiği görülmüştür (Aissani, & ark., 2021).

Doğru Akım (DC) Magnetron Püskürtme Tekniği

Sıçratma işleminde sisteme uygulanan voltaj bir doğru akım (DC) güç kaynağı olduğunda DC sıçratma adını almaktadır. Sistemde güç kaynağına mıknatıslar eklendiğinde sistem DC magnetron sıçratma tekniği olmaktadır. DC magnetron püskürtme, ince film katmanlarını iletken alt tabakalar üzerine biriktirmek için oldukça avantajlı bir fiziksel buhar biriktirme tekniğidir. Geleneksel bir dc magnetron püskürtme (dcMS) deşarjında, katot sabit bir

negatif voltajda tutulur ve plazmada üretilen pozitif iyonlar, püskürtme yoluyla hedef yüzeyden bir atom ve molekül buharı oluşturarak katot hedefine doğru hızlandırılır. Geleneksel düzlemsel dcMS kaynakları genellikle 0,1-1,5 Pa basınç aralığında çalışma gazı olarak argon ve 300-700 V aralığında uygulanan bir katot voltajı kullanılarak çalıştırılır (Waits, 1978). Taban malzeme çevresindeki elektron yoğunluğu tipik olarak 10^{15} - 10^{17} m⁻³ ve statik biriktirme hızı 20-200 nm/s aralığındadır. Püskürtülen malzemenin iyonlaşma derecesi genellikle çok düşüktür (Lundin, Minea & Gudmundsson, 2019; Petrov, Myers, Greene & Abelson, 1994). Taban malzemeyi çoğunlukla soy çalışma gazının iyonları bombalar ve püskürtülen parçacıkların yoğunluğu soy çalışma gazının yoğunluğundan çok daha düşüktür (Naghshara & ark., 2010). Son yıllarda DC magnetron püskürtme yöntemi ile elde edilen kaplama filmler ile ilgili yapılan literatürdeki bazı çalışmalar aşağıda özetlenmektedir:

AISI 420 paslanmaz çeliğin aşınma hacmini azaltmak ve bu çeliğe başka spesifik özellikler kazandırmak için farklı oranlarda Ag ve Cu nanoparçacıkları ile katkılanmış TiAlN kaplamaları Ti/Al ve Ag/Cu olmak üzere iki hedef kullanılarak DC magnetron püskürtme yoluyla kaplanmışlardır. Numunelerin tribolojik özelliklerinin belirlenmesi için disk üstü bilye (ball on disc) test yöntemi kullanılmıştır. Kompozit kaplamalar başlangıçta, metalik nanoparçacıkların katı yağlama etkisinden dolayı Ag-Cu içeriğindeki artışla birlikte sertlikte sürekli bir azalma ile sürtünme katsayısı ve aşınma hacminde önemli bir azalma göstermiştir (Perea & Bejarano, 2020). AISI 316L tipi paslanmaz çeliğin yüzeyine DC magnetron püskürtme ile tantalum (Ta) kaplama yapıp, yüzeylerin aşınma davranışı ve mikrosertlik özelliklerini araştırmışlardır. Aşınma testleri için pin-on-disk tribometre kullanılmış ve bu testler çeşitli uygulanan normal yük koşulları (10 , 20 ve 40 N) ve 10 m'lik bir kayma mesafesi altında simüle edilmiş vücut sıvısında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yük miktarı 40 N olduğu zaman $62,50 \times 10^{-5}$ mm³/Nm'lik en yüksek aşınma oranı elde edilmiştir. Ta kaplamalı 316L SS'nin aşınma direnci ve yüzey sertliğinin kaplama kalınlığının artmasıyla arttığı bulunmuştur (Pathote & ark., 2022). Ti-Cr-N kaplamaları karışık Ar/N₂ atmosferinde titanyum ve krom hedeften reaktif DC magnetron co-püskürtme tekniği ile Si (100) ve AISI D2 takım çeliği alt tabakaları üzerine biriktirmişlerdir. Ar/N₂ oranının Ti-Cr-N kaplamaların kimyasal bileşimi, yapısı, morfolojisi, içsel gerilimi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Tüm numuneler için, XRD analizi karışık nitrür fazlarının oluşumunu göstermiştir. Ar/N₂ oranı 3 olan kaplamalar, yoğun yapı ile daha pürüzsüz yüzey morfolojisine ve 24 GPa değeri ile en yüksek sertliği göstermiştir (Kehal, Saoula & Nouveau, 2021).

Ti_{0,41}Al_{0,48}Ta_{0,11}N monolitik kaplama ile Ti_{0,41}Al_{0,48}Ta_{0,11}N/Ti_{0,45}Al_{0,55} ve Ti_{0,41}Al_{0,48}Ta_{0,11}N/Ta çok katmanlıların mekanik özellikleri, mikro yapısı, yapışma ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Kaplamalar, reaktif DC magnetron ortak püskürtme ile titanyum alt-tabakalar üzerine biriktirilmiştir.

Çok katmanlı kaplamaların, daha yumuşak metal ara katmanların ölçüm değerlerine katkısı nedeniyle monolitik kaplamaya göre daha düşük mekanik özellikler gösterdiği bulunmuştur. En iyi aşınma performansı, $Ti_{0.41}Al_{0.48}Ta_{0.11}N/Ti_{0.45}Al_{0.55}$ çok katmanlı malzemesinden elde edilmiştir (Shugurov & Kuzminov, 2022). DC magnetron püskürtme ile sentezlenen 10 ve 20 nm kalınlığındaki NiO katmanları ile bir TiO_2 nanoyapılı kaplama filmi birleştirilerek yüksek fotokatalitik aktivite katmanları elde etmişlerdir. Kaplamaların fotokatalitik aktivitesi, UV ışığı altında metilen mavisi bozulması yoluyla test edilmiştir. TiO_2 ve NiO katmanları arasında bir p-n hetero bağlantısının oluşumu, işlemsiz TiO_2 katmanlarına kıyasla bozunma oranlarını iyileştirmiştir. NiO püskürtme gücü ve ardından kaplama kalınlığı 20 nm'den daha yüksek değerlere çıkarıldığında neredeyse hiçbir fark görülmemiştir (Villamayor & ark., 2023). Reaktif DC magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak AISI 316L paslanmaz çelik yüzeyler üzerinde nitrojen gazının kısmi basınç yüzdesi %5, %10 ve %15 gibi farklı oranlarda seçilerek TaN nanoyapılı kaplamalar üretmişlerdir. Kaplamaların korozyon davranışını incelemek için Ringer çözeltisinde elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve potansiyodinamik polarizasyon (PDP) testleri gerçekleştirilmiştir. %15 nitrojen içeren kaplamaların sert ortorombik ve altıgen tantal nitrür fazlarından oluştuğunu, serbest gözeneklere ve daha yoğun mikro yapıya sahip olduğu görülmüştür. %15 nitrojen içeren kaplamalar tüm daldırma sürelerinde diğer iki kaplamaya göre daha iyi korozyon davranışı sergilemiştir (Babaei & ark., 2020). MoS_2 - CaF_2 -Ag kompozit kaplamanın mekanik ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Bir argon plazmasında MoS_2 , CaF_2 ve Ag hedeflerinin doğru akım (DC) ve radyo frekansı (RF) magnetron püskürtmesi kullanılarak oldukça parlatılmış AMS 5898 çelik alt tabaka üzerinde yaklaşık 530 nm kalınlığında tek katmanlı bir MoS_2 - CaF_2 -Ag kompozit kaplama geliştirilmiştir. Oda sıcaklığında ve $50^\circ C$ 'de aşınma, kırılğan çatlama, parçalanma ve delaminasyon; 100 ile $250^\circ C$ 'de aşındırıcı, yapışkan ve oksidatif aşınma kombinasyonu gözlemlenmiştir. MoS_2 - CaF_2 -Ag kompozit kaplama, ortam atmosferik koşullarında COF ve aşınmayı azaltmada etkili olduğu ve uzay uygulamalarında tribo sistemlerinin katı yağlanması için son derece uygun hale getirdiği belirlenmiştir (Mufti & ark., 2023).

Darbeli Magnetron Püskürtme (PMS) Tekniği

Darbeli Magnetron Püskürtme (PMS) işlemi, özellikle dielektrik malzemelerin biriktirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Darbe parametrelerinin (frekans, görev, ters gerilim) doğru seçimi, yüksek derecede yalıtıcı kaplama sırasında bile uzun süreli arksız çalışma koşullarıyla sonuçlanabilir. DC magnetron püskürtme yöntemi ile üretilen filmlere kıyasla çok daha gelişmiş yapısal, elektriksel ve optik özellikler darbeli püskürtme ile üretilebilir. Darbeli püskürtme tekniği güneş kontrolü ve düşük emisyonlu kaplamalar, paketleme üzerindeki bariyer katmanları, düz panel ekranlar

ve güneş pilleri dahil olmak üzere birçok uygulama için geniş alanlı çoklu magnetron sistemlerinde ticari olarak kullanılmaktadır (Constantin & ark., 2011; Nadel & Greene, 2001). Darbeli magnetron püskürtme (PMS) tekniği ile elde edilen kaplama filmler ile ilgili son yıllarda yapılan literatürdeki bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Bor karbür, nötron absorpsiyonu için nötron bazlı algılama uygulamalarında kaplama filmi olarak kullanılan seramik bir malzemedir. Alüminyum ise nötronlara karşı şeffaf olduğu için tipik olarak bir alt tabaka malzemesi olarak kullanılır. Bununla birlikte, bu iki farklı malzeme arasındaki yapışma, termal genleşme katsayılarındaki farklılık ve ayrıca yapışkan hasarına neden olabilecek kararsız alüminyum-karbon bağlarının oluşumu nedeniyle zordur. Bor karbür ve alüminyumun verimli bir şekilde bağlanmasını geliştirmek için, darbeli DC magnetron püskürtme kullanarak bir alüminyum alt tabaka üzerinde yapışkan ara titanyum tabakası ile yaklaşık 1-3,5 μm 'lik bor karbür kaplamalar biriktirilmiştir. Niteliksel yapışma mukavemeti testi, yaklaşık -150 V'den daha yüksek bir öngerilim voltajı uygulanan kaplamaların, -1 GPa'dan yüksek kalıntı gerilimi ve alt tabakaya zayıf yapışma özelliği göstermiştir. Termal genleşme katsayılarındaki tutarsızlıkları azaltmak için ayarlanmış bir titanyum katmanının desteğiyle birlikte, bor karbür kaplamaların 27 aydan uzun süredir sürekli ve güçlü bir şekilde yapıştığı kanıtlanmıştır (Waichman & ark., 2023). Kobalt oksit filmler, 1 Pa'lık bir argon gazı basıncında ve farklı oksijen karışımları ile argon gazı içinde reaktif yüksek güçlü darbeli magnetron püskürtme (HiPIMS) ve orta frekanslı darbeli magnetron püskürtme (PMS) yardımıyla cam malzeme üzerinde biriktirilmiştir. Biriktirilen filmlerin kristal yapısı ve elektriksel özdirencinin, biriktirme koşullarına bağlı olduğu bulunmuştur. Birikmiş filmler, stokiyometrik olmayan bir Co_3O_4 spinel tipi kristal yapı ve boş kobalt bölgeleri ile uyumludur. HiPIMS, tavlama sırasında gevşeyen büyük bir iç stres göstermiştir. Elektrik özdirenci, HiPIMS tarafından biriktirilen filmler için PMS'ye kıyasla birkaç kat daha küçüktür (Hippler & ark., 2021). Bir diğer çalışmada, termal olarak kararsız bir yarı iletken malzeme olan bakır nitür numuneleri, darbeli magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak katmanlar halinde sentezlenmiştir. Biriktirilen katmanlar, malzemenin yapısının termal gelişiminin daha iyi anlaşılmasını sağlamak için ısı işleme tabi tutulmuştur. İncelenen tek fazlı malzeme kararlılık aralığından ($T \sim 230^\circ\text{C}$) başlayarak, iki fazlı bir yapının orta aralığına kadar farklı sıcaklıklarda bir dizi işlem gerçekleştirilmiştir. Birikmiş numuneler, literatür verilerine karşılık gelen kafes sabiti ile bir anti- ReO_3 polikristal yapı sergilemiştir. Sonuçlar, daha yüksek sıcaklıklarda gözle görülür yapısal değişikliklere neden olduğunu ve bakır nitür katmanlarının stokiyometrisine bağlı olarak, malzemenin termal kararlılığı farklı olduğunu göstermiştir (Okrasa & ark., 2021). Mozaik hedeflerden çok bileşenli (Al, W, Ni, Ti, Nb) alaşım kaplamaların sentezinin bulgularını araştırılmıştır. Farklı

plazma üretim koşulları altında darbeli bir magnetron püskürtme yöntemi ile modülasyon frekansı (10 Hz ve 1000 Hz) ve güç (600 W ve 1000 W) şartlarında işlem gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tek fazlı bir katı çözelti olarak şekilsiz bir yapı sergileyen, çökelmiş kaplamaların oluşumunu göstermiştir. Proses parametrelerinin elde edilen morfoloji üzerinde bir etkisi olarak yoğun ve homojen olduğu kadar sütunlu bir morfoloji de elde edilmiştir. Yüksek entropi alaşımlı (HEA) kaplamalarda frekans modülasyonundaki değişimin ve tavlama sonrası işlemin malzemenin sertliğindeki artışa katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır (Strzelecki & ark., 2022). Darbeli dc püskürtme ile hazırlanan TiC ve TiN ince filmlerin yapısal, nanomekanik ve korozyon özellikleri incelemiştir. Nanoindentasyon tekniği, TiC filmlerin TiN filmlerinden daha üstün girinti sertliğine ve sırasıyla 18.61 ve 196.57 GPa young modülüne sahip olduğu belirlenmiştir. Doğal deniz suyunda ve %3,5 NaCl çözeltisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal empedans spektroskopisi ölçümleri, düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip TiC kaplamasının, M50 çelik malzeme için TiN kaplamalardan daha üstün bir pasivasyon ve daha iyi korozyon koruması gösterdiği sonucuna varılmıştır (Suresh & ark., 2021). Mo-Si-B ve Mo-Hf-Si-B kaplamaları kompozit seramik katotlar kullanılarak hem DC hem de darbeli akım magnetron püskürtme ile biriktirmişlerdir. Kaplamaların yapısı XRD, SEM, EDS ve GDOES ile incelenmiştir. Sonuçlar, darbeli akım biriktirmenin kaplamaların büyüme hızını ve kaplamaların ana bileşeni olan h-MoSi₂ fazının tane boyutunu azalttığını ve MoB₂ oluşumunu desteklediğini göstermektedir. Hafniyumun eklenmesi, kaplamaların yoğunluğunu arttırmış ve istenmeyen sütunlu yapının oluşumunu bastırmıştır. Tüm kaplamalar 1500°C'de oksidasyona dirençli iken, Mo-Hf-Si-B bileşimi, iki katmanlı HfO₂/SiO₂ koruyucu film oluşumu nedeniyle Mo-Si-B kaplamalardan daha üstün oksidasyon direnci elde edilmiştir. Oksit tabakasının kalınlığı, darbeli akım kullanılarak biriktirilen kaplamalar için daha yüksek sonuçlanmıştır (Kiryukhantsev-Korneev & ark., 2020).

2. MAGNETRON PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN SERAMİK FİMLER VE ÖZELLİKLERİ

Uygulamaya bağlı olarak alt tabaka üzerine kaplanan farklı seramik malzeme türleri vardır. Seramik kaplamalar, metal malzemelerin kirlenme önleyici, kendi kendini temizleme, korozyon direnci, aşınma direnci, yağ/su ayırımı ve biyouyumluluk gibi yüzey özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilen ideal kaplamalar olarak kabul edilir (Zang & Xun, 2021). Bu tür kaplamaların literatürde özellikle metalik malzeme yüzey üzerine çok fazla üretim yöntemi mevcuttur. Bunlardan bazıları: mikroark oksidasyon, daldırmalı kaplama, atomik tabaka biriktirme, kimyasal buhar çöktürme, fiziksel buhar çöktürme, magnetron püskürtme, plazma yüzey işlemleri, sol-jel ve elektrokimyasal kaplama yöntemleridir (Bhamare & Kulkarni, 2023). Metalik malzemelerin yüzeyinde magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak genellikle elde edilen

seramik filmler, bu filmlerin özellikleri ve bu konuda yapılan örnek bir literatür çalışması şöyle özetlenmiştir:

Alüminyum oksit (Al_2O_3) kaplama filmi sert, aşınmaya dayanıklı yüzeyler geliştirmede potansiyel olarak çok etkilidir. Onlarca yıldır, alüminyum oksit kaplamayı biriktirmek için birçok teknik yaygın olarak kullanılmıştır. $\alpha-Al_2O_3$ ve $\gamma-Al_2O_3$ 'ten oluşan alüminyum oksit kaplama, alt tabakaya mükemmel yapışma sergiler (Shi-Gang & ark., 2005). Al_2O_3 filmi optik, elektronik ve biyomedikal alanlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahip olan olağanüstü mekanik özellik ve termostabilite özelliklerine sahiptir. Araştırmacılar farklı yüzeyler üzerine Al_2O_3 kaplamak için farklı yöntemler kullanmışlardır. Bunlardan magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak elde edilen bir çalışmada, amorf Al_2O_3 ince filmler, reaktif DC dairesel magnetron püskürtme ile biriktirilmiştir. Ark oluşumunu en aza indirmek için darbeleri bir güç kaynağı kullanılmıştır. Kullanılan proses parametrelerine bağlı olarak Al_2O_3 filmler, 12,6 GPa ile 20,6 GPa arasında nanosertliğe, 177 GPa ile 219 GPa arasında elastik modüle, -249 MPa ile 242 MPa arasında kalıntı gerilmeye, 1,30 ile 1,72 arasında O/Al oranlarına ve yoğunluğu 2,32 ile 3,77 g/cm³ arasında bulunmuştur (Koski, Hölsä & Juliet, 1999).

Titanyum dioksit (TiO_2), geçiş metal oksitleri arasında en çok araştırılan yarı iletken malzemelerden biridir. TiO_2 , olağanüstü katalitik ve yarı iletken özelliklere sahip, düşük maliyetli, kimyasal olarak kararlı bir malzemedir. TiO_2 filmi çok ince katmanlarda bile korozyona karşı koruma sağlayan inert ve kimyasal stabilite ile karakterize edilir. Ayrıca, bu oksit film sertliği, aşınmayı ve sıcaklık direncini geliştirir (Kania, Pilarczyk & Szindler, 2020; Swathi & Naik, 2023). TiO_2 üç temel kristal fazda bulunabilir. Bunlar anataz (tetragonal), rutil (tetragonal), brokit (ortorombik) ve amorf fazlardır. Bunlardan anataz ve rutil fazları UVA ışığına (320-400 nm) maruz kaldığında mükemmel fotokatalitik ve antibakteriyel özelliklere sahiptir (Bedikyan, Zakhariyev & Zakhariyeva, 2013). Oda sıcaklığında reaktif magnetron püskürtme ile 5083 alüminyum (Al) alaşımı üzerine kaplanan TiO_2 filmlerin mikroyapı, anti-korozyon ve anti-kirillik özelliklerine püskürtme gücünün etkisi sistematik olarak incelemişlerdir. TiO_2 filminin esas olarak anataz fazından oluştuğunu, ayrıca küresel ve piramit şekilli parçacıklar şeklinde meydana geldiği görülmüştür. Hem korozyon önleyici hem de anti-bakteriyel özellikler, ilk olarak artan püskürtme gücü ile gelişmiştir. 12 kW güç uygulandığında kaplamalarda korozyon önleyici ve antibakteriyel özelliklerin kombinasyonunun en iyi sonuçları elde edilmiştir (Wang & ark., 2022).

Silikon dioksit (SiO_2) ince filmler, optik ince filmler alanındaki en önemli düşük kırılma indeksli malzemelerden biridir. Düşük absorpsiyon, amorf yapı, yüksek termal kararlılık ve korozyon direncine sahip filmler, yansıma önleyici film, yüksek yansıtıcı film, spektral film, optik filtre filmi ve diğer optik bileşenler gibi çeşitli optik çok katmanlı filmlerin tasarımında yaygın

olarak kullanılmaktadır. Genel olarak metalik malzemelerde kaplama filmi olarak korozyon ve aşınma direncini artırmaktadır. SiO₂ filmler ince filmler, termal oksidasyon, termal buharlaştırma, iyon destekli biriktirme, iyon ışını püskürtme, magnetron püskürtme, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme, sol-jel ve darbeli lazer biriktirme ile hazırlanabilir (Liu & ark., 2018). Magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak yapılan bir çalışmada, SiO₂ ince filmi radyo frekansı (RF) magnetron püskürtme ile kuvars cam taban malzemeler üzerine biriktirilmiştir. O₂/Ar akış oranı ve ısı işleminin filmin O/Si mol oranı, yüzey morfolojisi ve optik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. O₂/Ar akış oranı arttıkça partiküllerin ortalama boyutu küçülerek daha üniform hale gelmiş ve yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Filmin kırılma indisi ve soğurma özelliği sürekli olarak azalırken, kaplanmış cam alt tabakanın 300-1100 nm içindeki ortalama geçirgenliği sürekli olarak %91,7'den %92,9'a yükselmiştir (Wang & ark., 2022).

Manganez dioksit (MnO₂), en kararlı oksidi olan manganez dioksit dünyada bol miktarda rezerve sahiptir ve enerji, kataliz ve kanalizasyon arıtımında yaygın olarak kullanılan düşük maliyetli, çevre dostu ve basit hazırlama avantajlarına sahiptir (Zang & Xun, 2021). Magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak biriktirilen MnO₂ filminin üç farklı faz yapısı (- γ, β ve λ) belirlenmiş ve MnO₂ fazının mevcudiyetinin püskürtme atmosferindeki oksijen içeriğine bağlılığı bulunmuştur. Seçilen MnO₂ fazları daha sonra LiCl bazlı jel elektrolitli şeffaf süper kapasitörler için nanoyapılı ZnO elektrotların üzerine ultra ince kaplamalar olarak uygulanmıştır. λ-MnO₂ içeren filmler, hem 550 nm'de %62'lik en yüksek optik şeffaflığı hem de 73,1 µF/cm²'ye eşit olan süper kapasitör yapısındaki en yüksek özgül kapasitansı sergilemiştir (Borysiewicz & ark., 2016) .

Zirkonyum dioksit (ZrO₂), monoklinik, tetragonal ve kübik olmak üzere sıcaklığa bağlı üç polimorf yapı sergilemektedir. Zirkonyum oksit 1170°C'de monoklinikten dörtgen yapıya ve 2370°C'de dörtgenden kübik yapıya faz dönüşümleri gösterirken erime noktası 2680°C'dir. ZrO₂ yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özellik ve tokluk özellikleri varken, ayrıca yüksek korozyon direncine de sahiptir (Koski, Hölsä & Juliet, 1999). Magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak yapılan bir çalışmada, ZrO₂ ince filmleri, (0 ile -100 V arası) D.C. bias voltajlarında RF magnetron püskürtme ile 316L paslanmaz çelik üzerine büyütülmüştür. Biriktirme, bir Ar-0₂ gaz karışımında saf bir zirkonyum hedefi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Filmlerin korozyon davranışı, potansiyodinamik polarizasyon yöntemi kullanılarak Hank solüsyonunda gerçekleştirilmiştir. İşlemsiz ve kaplanmış numuneler arasındaki karşılaştırma, kaplanmış numuneler için korozyon akımı yoğunluğunda bir azalma olmuştur. -100 V'ta biriken filmin minimum korozyon hızı 0,04992 mpy'dır, bu da kaplanmamış çeliğinkinden (0,88135 mpy) yaklaşık 18 kat daha azdır. Optimum korozyon önleyici performans ve sertlik, -100 V öngerilim voltajın-

da biriktirilen ZrO_2 için elde edilmiştir (Zegtouf & ark., 2020).

Silisyum karbür (SiC), monolitik silikon nitrür (Si_3N_4), titanyum nitrür (TiN), ve alüminyum nitrür (AlN) gibi oksit olmayan seramik malzemeler, endüstriyel uygulama alanlarında üstün yüksek sıcaklık dayanımı ve mukavemeti sergiler (Zang & Xun, 2021). Silisyum karbür (SiC), genellikle katı hal aydınlatmasında ve güçte kullanılan geniş bant aralığı, yüksek manyetik, mekanik, optik ve elektronik özellikler gibi sahip olduğu olağanüstü özellikleri nedeniyle önemli bir yarı iletken olarak kabul edilmektedir. Ayrıca iyi mukavemete, düşük termal genleşmeye, yüksek termal iletkenliğe ve iyi kimyasal dirence sahiptir (Xu & ark., 2021). SiC kaplı karbon fiberler, oda sıcaklığında farklı RF magnetron püskürtme güçleriyle hazırlanmış ve kaplanmış karbon liflerinin düzgün, sürekli ve kusursuz yüzeylere sahip olduğunu bulunmuştur. Farklı püskürtme güçlerine sahip kaplanmış karbon fiberlerin ortalama dayanımları diğer faktörlerden etkilenmez. SiC kaplı karbon fiberlerin filament mukavemeti, 200 W'dan daha az püskürtme gücünde kaplanmamış karbon fiberlere kıyasla yaklaşık %2 artmıştır. Kaplanmış fiberlerin filament mukavemetleri, 250 W ve 300 W püskürtme güçlerinde sırasıyla %9,3 ve %12 arttığı gözlemlenmiştir (Cheng & ark., 2016).

Silikon nitrür (Si_3N_4), yüksek mukavemet, termal kararlılık ve sürünme direnci ile birlikte iyi bir anti-oksidasyon özelliğine sahiptir. Porselen veya cam gibi bilinen seramiklerin aksine, silisyum nitrür çok yüksek mukavemete sahiptir ve tüm gelişmiş seramikler arasında en yüksek kırılma direncine sahiptir. Günümüzde Si_3N_4 filmlerin endüstriyel kullanım alanları arasında yüksek performanslı rulmanlar, türbin kanatları ve kızdırma bujileri yer alır. Ayrıca Si_3N_4 , spinal füzyon implantlarında, protez, kalça ve diz eklemlerinin bileşenlerini taşımak için kullanılmaktadır (Bal & Rahaman, 2012). Otomobil parçalarının yapımında kullanılan Al ve alaşımlarının mekanik özelliklerinin artırılmasının amaçlandığı bir çalışmada, Si_3N_4 filmler RF magnetron püskürtme kullanılarak biriktirilmiştir. Biriktirilen filmler, tercihli bir yönlendirme düzlemi ile polikristal yapı göstermiştir. Düşük sürtünme katsayısına sahip kaplı yüzeylerde, işlemsiz yüzeylerden elde edilen 96°'lik değerden, 72°'e azaldığı bulunmuştur (Kumar & ark., 2016).

Alüminyum nitrür (AlN), yüksek erime noktasına ve mükemmel termal iletkenliğe sahip mekanik olarak sert bir malzemedir. Gözenekli AlN seramikleri, pasif bariyer katmanları, yüksek frekanslı akustik dalga cihazları ve yüksek sıcaklık pencereleri için çekicidir. Bu seramikler, birleşik düşük dielektrik sabitleri (1 MHz'de 8.0-9.2) ve yüksek dielektrik güçleri (14-27 kV/mm) nedeniyle entegre devreler oluşturmak için binlerce transistörü tek bir çipte birleştirmeyi içeren çok büyük ölçekli entegrasyon potansiyeline sahiptir (Reedijk & Poepelmeier, 2013). Magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak AlN kaplama filmi üretilen bir çalışmada, bu filmlerin dielektrik malzemeler üzerinde biriktirme oranını artırmak için argon doğrudan bir

magnetron hedefinin yüzeyine verilmiş ve ardından hızlandırıcı bir ızgara aracılığıyla işlem odasına aktarılmıştır. Nitrojenin ayrı bağlantı parçaları aracılığıyla odaya girişi, AlN kaplamaların sentezi için uygun bir plazmanın taban malzeme yakınında oluşmasına izin vermektedir. Hedef ve ızgara yüzeylerinin yakınındaki nitrojen içeriği, hedef ve ızgara üzerindeki dielektrik film birikimini sınırlayan alt tabakaya yakın olandan çok daha düşük olduğu görülmüştür. Kaplamayı bombardıman eden hızlı atomların enerjisindeki büyüme nedeniyle, kaplama biriktirme hızında üç kattan fazla bir artış, kaplama yapısında ve yapışmada önemli bir iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır (Metel & ark., 2020).

Titanyum nitrür (TiN) filmler yüksek sertlik, iyi korozyon direnci, ısı direnci ve mükemmel aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Genel olarak, fiziksel buhar biriktirme (PVD), buharlaştırma, püskürtme, iyon kaplama, magnetron püskürtme ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile biriktirilebilir (Miyake, 2005). Bipolar plaka olarak kullanılan 316L paslanmaz çeliğin korozyon direncini ve elektriksel iletkenliğini artırmak için yapılan bir çalışmada magnetron püskürtme yoluyla TiN ve ZrN kaplamalar yüzeyde biriktirilmiştir. Sonuçlar, TiN ve ZrN kaplamanın 316L paslanmaz çeliğin korozyon direncini önemli ölçüde artırabildiğini göstermektedir. Ayrıca, temas açısı sonuçları TiN ve ZrN'nin paslanmaz çeliğin hidrofobikliğini de iyileştirebileceğini göstermiştir (Yi & ark., 2019).

3. Sonuç ve Öneriler

Günlük hayatımızda malzeme bilimi ve mühendisliği, özellikle endüstrinin gelişmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu gelişmeler, aşınma ve korozyondan kaynaklanan birçok ekonomik kaybı azaltmaktadır. Yüzey bilimi ve mühendisliğinde özellikle mühendislik alanında en çok kullanılan metal ve alaşımlarının yüzey özelliklerinin geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Özellikle metal ve alaşım yüzeylerinin korozyon, aşınma, ısı, yalıtım ve sürtünme sorunlarını çözmek için seramik kaplamalar yüksek performans sağlamaktadır. Seramik kaplamaların yeni gelişimi ile çok daha iyi aşınma ve korozyon önleyici seramik kaplamalar elde etmek, yüzey teknolojisinin uzun vadeli bir gelişme hedefidir. Seramik kaplamaların üretimi birçok farklı yüzey kaplama tekniği kullanılarak yapılmaktadır. Bu yöntemlerden magnetron püskürtme yöntemi yüksek hız, düşük sıcaklık ve düşük hasar avantajları nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılan bir PVD tekniğidir. Son yıllarda, magnetron püskürtme teknikleri alanında çok sayıda gelişme olmuştur. Bu yazıda magnetron püskürtme alanında yapılan birkaç yeni gelişme ile farklı magnetron püskürtme yöntemleri de anlatılmıştır. Ayrıca metalik malzemeler üzerine magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak en çok elde edilen oksit ve oksit olmayan seramik kaplama filmleri (Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , MnO_2 , SiC , Si_3N_4 , TiN ve AlN) ile ilgili bilgilerde verilmiştir. Bu kaplamalar genellikle biyomedikal, anti-aşınma, anti-korozyon, yüksek sı-

caklık uygulamaları, sensörler, güneş enerjisi uygulamaları, denizcilik sektörü, elektronik, aydınlatma ve optik uygulamalarda kullanılmaktadır. Sonuç olarak, magnetron püskürtme tekniği kullanılarak elde edilen seramik kaplamalar endüstriyel üretim teknolojisinde vazgeçilmez bir teknoloji olan mükemmel mekanik özelliklere, korozyon direncine ve sürtünme direncine sahip olabilir. Gelecekte çeşitli endüstriyel alanlarda benzersiz bir koruyucu kaplama tasarlamak ve üretmek için magnetron püskürtme yöntemleri ile elde edilen gelişmiş seramik filmler yeni fikirler sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Abdullah, H. A., Adnan, R. S. A., & Anae, R. A. (2022). Deposition of CaO to protect carbon steel by electrophoretic method. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4556-4561.
- Aissani, L., Fellah, M., Chadli, A. H., Samad, M. A., Cheriet, A., Salhi, F., ... & Al-hussein, A. (2021). Investigating the effect of nitrogen on the structural and tribo-mechanical behavior of vanadium nitride thin films deposited using RF magnetron sputtering. *Journal of Materials Science*, 56, 17319-17336.
- Anders, A. (2017). Tutorial: Reactive high power impulse magnetron sputtering (R-HiPIMS). *Journal of Applied Physics*, 121(17), 171101.
- Anderson, G. S., Mayer, W. N., & Wehner, G. K. (1962). Sputtering of dielectrics by high-frequency fields. *Journal of Applied Physics*, 33(10), 2991-2992.
- Babaei, K., Fattah-alhosseini, A., Elmkhah, H., & Ghomi, H. (2020). Surface characterization and electrochemical properties of tantalum nitride (TaN) nanostructured coatings produced by reactive DC magnetron sputtering. *Surfaces and Interfaces*, 21, 100685.
- Bai, M., Chen, M., Li, X., & Wang, Q. (2022). One-step CVD growth of ZnO nanorod/SnO₂ film heterojunction for NO₂ gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 373, 132738.
- Bal, B. S., & Rahaman, M. N. (2012). Orthopedic applications of silicon nitride ceramics. *Acta biomaterialia*, 8(8), 2889-2898.
- Baranov, O., Romanov, M., Wolter, M., Kumar, S., Zhong, X., & Ostrikov, K. (2010). Low-pressure planar magnetron discharge for surface deposition and nanofabrication. *Physics of plasmas*, 17(5), 053509.
- Baruwa, A. D., Abegunde, O. O., Akinlabi, E. T., Oladijo, O. P., Makhatha, E. M., Iku-mapayi, O. M., ... & Majumdar, J. D. (2021). Radio Frequency Magnetron Sputtering Coatings of Biomedical Implants Using Nanostructured Titanium Carbide Thin films. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 7(4), 138.
- Bedikyan, L., Zakhariev, S., & Zakharieva, M. (2013). Titanium dioxide thin films: preparation and optical properties. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 48(6), 555-558.
- Bhamare, V. S., & Kulkarni, R. M. (2023). Methods for fabrication of ceramic coatings. In *Advanced Flexible Ceramics* (pp. 215-242). Elsevier.
- Bishop, C. A. (2011). *Magnetron Sputtering Source Design and Operation. Vacuum Deposition onto Webs, Films and Foils*, 2nd ed.; William Andrew Publishing: Norwich, NY, USA, 337-362.
- Borysiewicz, M. A., Wzorek, M., Myśliwiec, M., Kaczmarski, J., & Ekielski, M. (2016). MnO₂ ultrathin films deposited by means of magnetron sputtering: relationships between process conditions, structural properties and performance

- in transparent supercapacitors. *Superlattices and Microstructures*, 100, 1213-1220.
- Cao, Z. (2011). Thin film growth for thermally unstable noble-metal nitrides by reactive magnetron sputtering. In *Thin Film Growth* (pp. 185-210). Woodhead Publishing.
- Chaiyakun, T., Phae-Ngam, W., & Prathumsit, J. (2020). High Deposition Rate of Dual-cathode DC Unbalanced Magnetron Sputtering. *American Journal of Applied Sciences*, 17(1), 231-239.
- Chang, S. H., Tsai, B. C., Huang, K. T., & Yang, C. H. (2022). Investigation of the wear and corrosion behaviors of CrN films onto oxynitriding-treated AISI H13 alloy steel by the direct current magnetron sputtering process. *Thin Solid Films*, 758, 139434.
- Chauhan, K. V., & Rawal, S. K. (2014). A review paper on tribological and mechanical properties of ternary nitride based coatings. *Procedia Technology*, 14, 430-437.
- Chen, X., Zhang, Z., Duan, Y., & Wang, X. (2023). Growth mechanism of 2024 aluminum alloy micro-arc oxide layer in cobalt-containing electrolyte. *Surface and Coatings Technology*, 462, 129461.
- Cheng, Y., Huang, X., Du, Z., Xiao, J., Zhou, S., & Wei, Y. (2016). Microstructure and properties of SiC-coated carbon fibers prepared by radio frequency magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 369, 196-200.
- Chiang, C. M., & Chang, L. S. (2005). Microstructure and characterization of aluminum oxide thin films prepared by reactive RF magnetron sputtering on copper. *Surface and Coatings Technology*, 198(1-3), 152-155.
- Constantin, D. G., Apreutesei, M., Arvinte, R., Marin, A., Andrei, O. C., & Munteanu, D. (2011, February). Magnetron sputtering technique used for coatings deposition; technologies and applications. In *7th International Conference on Materials Science and Engineering* (Vol. 12, pp. 29-33).
- Fager, H. (2014). *Growth and Characterization of Amorphous Multicomponent Nitride Thin Films* (Doctoral dissertation, Linköping University Electronic Press).
- Gim, H. G., Kim, Y. T., & Choi, J. (2023). Polydimethylsiloxane-assisted plasma electrolytic oxidation of Ti for synthesizing SiO₂-TiO₂ composites for application as Li-ion battery anodes. *Electrochemistry Communications*, 148, 107455.
- Gudmundsson, J. T. (2020). Physics and technology of magnetron sputtering discharges. *Plasma Sources Science and Technology*, 29(11), 113001.
- Hippler, R., Cada, M., Ksirova, P., Olejnicek, J., Jiricek, P., Houdkova, J., ... & Hubicka, Z. (2021). Deposition of cobalt oxide films by reactive pulsed magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 405, 126590.
- Hishimone, P. N., Nagai, H., & Sato, M. (2020). Methods of fabricating thin films for energy materials and devices. In *Lithium-ion Batteries-Thin Film for Energy Materials and Devices*. IntechOpen.
- Howson, R. P., & Ja'fer, H. A. (1992). Reactive sputtering with an unbalanced magnet-

- ron. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 10(4), 1784-1790.
- Huang, H., Jiang, L., Yao, Y., Zhang, Z., Wang, Z., & Qi, R. (2021). Controlling Film Thickness Distribution by Magnetron Sputtering with Rotation and Revolution. *Coatings*, 11(5), 599.
- Ju, H., Jia, P., Xu, J., Yu, L., Geng, Y., Liu, M., & Wei, T. (2018). The effects of adding aluminum on crystal structure, mechanical, oxidation resistance, friction and wear properties of nanocomposite vanadium nitride hard films by reactive magnetron sputtering. *Materials Chemistry and Physics*, 215, 368-375.
- Juhasz, J. A., & Best, S. M. (2011). Surface modification of biomaterials by calcium phosphate deposition. In *Surface modification of biomaterials* (pp. 143-169). Woodhead Publishing.
- Kania, A., Pilarczyk, W., & Szindler, M. M. (2020). Structure and corrosion behavior of TiO₂ thin films deposited onto Mg-based alloy using magnetron sputtering and sol-gel. *Thin Solid Films*, 701, 137945.
- Kao, W. H., Su, Y. L., Horng, J. H., & Wu, W. C. (2021). Mechanical, tribological, anti-corrosion and anti-glass sticking properties of high-entropy TaNbSiZrCr carbide coatings prepared using radio-frequency magnetron sputtering. *Materials Chemistry and Physics*, 268, 124741.
- Kahal, A., Saoula, N., & Nouveau, C. (2021). Effect of Ar/N₂ flow ratio on the microstructure and mechanical properties of Ti-Cr-N coatings deposited by DC magnetron sputtering on AISI D2 tool steels. *Surface and Coatings Technology*, 421, 127444.
- Kelly, P. J., & Arnell, R. D. (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, 56(3), 159-172.
- Khairy, K. T., Song, Y., Yoon, J. H., Montero, J., Österlund, L., Kim, S., & Song, P. (2023). Thermo-chromic properties of vanadium oxide thin films prepared by reactive magnetron sputtering at different oxygen concentrations. *Vacuum*, 210, 111887.
- Kiryukhantsev-Korneev, P. V., Sytchenko, A. D., Potanin, A. Y., Vorotilo, S. A., & Levashov, E. A. (2020). Mechanical properties and oxidation resistance of Mo-Si-B and Mo-Hf-Si-B coatings obtained by magnetron sputtering in DC and pulsed DC modes. *Surface and Coatings Technology*, 403, 126373.
- Koski, K., Hölsä, J., & Juliet, P. (1999). Properties of aluminium oxide thin films deposited by reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 339(1-2), 240-248.
- Kumar, P. K., Manikandan, V. N., Raj, P. D., & Sridharan, M. (2016). Characterization of magnetron sputtered Si₃N₄ thin films deposited on Aluminum alloy substrates. *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 1536-1540.
- Liu, G., Shen, Z., He, L., Mu, R., & Huang, G. (2023). LaYZrO/YSZ double ceramic layer thermal barrier coatings by EB-PVD: Thermal performance, morphology and failure behavior. *Materialia*, 27, 101661.

- Liu, H., Wang, L., Jiang, Y., Li, S., Liu, D., Ji, Y., ... & Chen, D. (2018). Study on SiO₂ thin film modified by post hot isostatic pressing. *Vacuum*, 148, 258-264.
- Liu, J., Liu, D., Li, S., Deng, Z., Pan, Z., Li, C., & Chen, T. (2023). The effects of graphene oxide doping on the friction and wear properties of TiN bioinert ceramic coatings prepared using wide-band laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 458, 129354.
- Lundin, D., Minea, T., & Gudmundsson, J. T. (Eds.). (2019). High power impulse magnetron sputtering: fundamentals, technologies, challenges and applications.
- Ma, H., Chen, Y., Li, N., Tan, C., Rong, Y., Chen, H., ... & Zhang, L. (2023). Process optimization and effect of sputtering pressure on electrochromic properties of flexible WO₃ films prepared by DC magnetron sputtering. *Physica B: Condensed Matter*, 654, 414728.
- Maissel, L. I., Glang, R., & Budenstein, P. P. (1971). Handbook of thin film technology. *Journal of The Electrochemical Society*, 118(4), 114C.
- Mehrvarz, A., Khalil-Allafi, J., Motallebzadeh, A., & Khalili, V. (2022). The effect of ZnO nanoparticles on nanomechanical behavior of Hydroxyapatite electrodeposited on NiTi biomedical alloy. *Ceramics International*, 48(23), 35039-35049.
- Metel, A., Grigoriev, S., Volosova, M., Melnik, Y., & Mustafaev, E. (2020). Synthesis of aluminum nitride coatings assisted by fast argon atoms in a magnetron sputtering system with a separate input of argon and nitrogen. *Surface and Coatings Technology*, 398, 126078.
- Miyake, S. (2005). *Novel Materials Processing by Advanced Electromagnetic Energy Sources: Proceedings of the International Symposium on Novel Materials Processing by Advanced Electromagnetic Energy Sources (MAPEES'04)*. Elsevier.
- Mufti, T. A., Jan, S. G., Wani, M. F., & Sehgal, R. (2023). Development, mechanical characterization and high temperature tribological evaluation of magnetron sputtered novel MoS₂-CaF₂-Ag coating for aerospace applications. *Tribology International*, 182, 108374.
- Nadel, S. J., & Greene, P. (2001). Strategies for high rate reactive sputtering. *Thin Solid Films*, 392(2), 174-183.
- Naghshara, H., Sobhanian, S., Khorram, S., & Sadeghi, N. (2010). Measured density of copper atoms in the ground and metastable states in argon magnetron discharge correlated with the deposition rate. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(2), 025202.
- Natrayan, L., Balaji, S., Bharathiraja, G., Kaliappan, S., Veeman, D., & Mammo, W. D. (2021). Experimental investigation on mechanical properties of TiAlN thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Journal of Nanomaterials*, 2021, 1-7.
- Ogawa, H., Higuchi, T., Nakamura, A., Tokita, S., Miyazaki, D., Hattori, T., & Tsukamoto, T. (2008). Growth of TiO₂ thin film by reactive RF magnetron sputtering using oxygen radical. *Journal of Alloys and Compounds*, 449(1-2), 375-378.

- Ohring, M. (2001). *Materials Science of Thin Films: Deposition and Structure*. Elsevier.
- Okrasa, S., Wilczopolska, M., Strzelecki, G., Nowakowska-Langier, K., Chodun, R., Minikayev, R., ... & Zdunek, K. (2021). The influence of thermal stability on the properties of Cu₃N layers synthesized by pulsed magnetron sputtering method. *Thin Solid Films*, 735, 138889.
- Orjuela, F. A., Vallejo, F. F., Hahn, H., Olaya, J. J., Alfonso, J. E., & Velasco, L. (2023). Nitrogen flux effect on the mechanical properties of AlCrTiN Nanostructured coatings obtained by RF magnetron sputtering. *Ceramics International*, 49(11), 17867-17875.
- Özkan, D. (2020). Friction and wear enhancement of magnetron sputtered bilayer Cr-N/TiB₂ thin-film coatings. *Wear*, 454, 203344.
- Pathote, D., Jaiswal, D., Singh, V., Gautam, R. K., & Behera, C. K. (2022). Wear behavior and microhardness studies of tantalum (Ta)-coated 316L stainless steel by DC magnetron sputtering for the orthopedic applications. *Journal of Materials Science*, 1-18.
- Perea, D., & Bejarano, G. (2020). Development and characterization of TiAlN (Ag, Cu) nanocomposite coatings deposited by DC magnetron sputtering for tribological applications. *Surface and Coatings Technology*, 381, 125095.
- Petrov, I., Myers, A., Greene, J. E., & Abelson, J. R. (1994). Mass and energy resolved detection of ions and neutral sputtered species incident at the substrate during reactive magnetron sputtering of Ti in mixed Ar+ N₂ mixtures. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 12(5), 2846-2854.
- Pooyodying, P., Son, Y. H., Sung, Y. M., & Ok, J. W. (2022). The effect of sputtering Ar gas pressure on optical and electrical properties of flexible ECD device with WO₃ electrode deposited by RF magnetron sputtering on ITO/PET substrate. *Optical Materials*, 123, 111829.
- Reedijk, J., & Poeppelmeier, K. (2013). *Comprehensive inorganic chemistry II: from elements to applications*. (pp. 1-7196). Elsevier Ltd.
- Rossnagel, S. M., Sproul, W. D., & Legg, K. O. (1995). *Sputter Deposition, Opportunities for Innovation*. Advanced Surface Engineering/eds.: WD Sproul, LO Legg.-Switzerland: Technomic Publishing Co.
- Seo, O., Kim, J., Tang, J., Kumara, L. S. R., Kimoto, K., Miki, K., ... & Sakata, O. (2023). Control of atomic ordering of LiNiO₂ thin films on a sapphire substrate from rock-salt to layered structure using uniaxial compression. *Journal of Alloys and Compounds*, 945, 169177.
- Shi-Gang, X., Li-Xin, S., Rong-Gen, Z., & Xing-Fang, H. (2005). Properties of aluminium oxide coating on aluminium alloy produced by micro-arc oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 199(2-3), 184-188.
- Shugurov, A. R., & Kuzminov, E. D. (2022). Mechanical and tribological properties of Ti-Al-Ta-N/TiAl and Ti-Al-Ta-N/Ta multilayer coatings deposited by DC magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 441, 128582.

- Simionescu, O. G., Romanițan, C., Tutunaru, O., Ion, V., Buiu, O., & Avram, A. (2019). RF magnetron sputtering deposition of TiO_2 thin films in a small continuous oxygen flow rate. *Coatings*, 9(7), 442.
- Strzelecki, G. W., Nowakowska-Langier, K., Mulewska, K., Zieliński, M., Kosińska, A., Okrasa, S., ... & Zdunek, K. (2022). Multi-component low and high entropy metallic coatings synthesized by pulsed magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 446, 128802.
- Suresh, U., Kuppusami, P., Ramaseshan, R., & Dhanalakshmi, S. (2021). Structural, nanomechanical and electrochemical properties of TiC and TiN films prepared by pulsed DC magnetron sputtering technique. *Materials Today: Proceedings*, 47, 1091-1098.
- Swathi, K. S., & Naik, K. G. (2023). Structural, morphological, and optical studies of sol-gel spin coated TiO_2 thin films. *Materials Today: Proceedings*.
- Tiwari, A. (2017). *Handbook of antimicrobial coatings*. Elsevier
- Tripathi, S. K., & Ridhi, R. (2023). Semiconductor oxide nanomaterial. In *Carbon Nanomaterials and their Nanocomposite-Based Chemiresistive Gas Sensors* (pp. 41-74). Elsevier.
- Tudose, I. V., Comanescu, F., Pascariu, P., Bucur, S., Rusen, L., Iacomì, F., ... & Sucheà, M. P. (2019). Chemical and physical methods for multifunctional nanostructured interface fabrication. *Functional Nanostructured Interfaces for Environmental and Biomedical Applications*, 15-26.
- Umashanker, L., Bharathesh, T. P., Roopashree, C., & Saravanan, R. (2021). A Review on Ceramic Coatings for Low Carbon Steel Methods Materials and Applications. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1189, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- Villamayor, A., Pomone, T., Perero, S., Ferraris, M., Barrio, V. L., Eva, G., & Kelly, P. (2023). Development of photocatalytic nanostructured TiO_2 and NiO/TiO_2 coatings by DC magnetron sputtering for photocatalytic applications. *Ceramics International*, 49(11), 19309-19317.
- Waichman, S., Froim, S., Zukerman, I., Buzaglo, M., Chachashvili, M., & Barzilai, S. (2023). Magnetron sputtering of boron carbide coating on aluminum substrate—Experimental considerations for enhancing adhesion. *Surfaces and Interfaces*, 38, 102772.
- Waits, R. K. (1978). Planar magnetron sputtering. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 15(2), 179-187.
- Wang, B., Wei, S., Guo, L., Wang, Y., Liang, Y., Huang, W., ... & Xu, B. (2022). Effect of sputtering power on microstructure and corrosion properties of TiO_2 films deposited by reactive magnetron sputtering. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 2171-2178.
- Wang, F., & Wu, J. (2022). *Modern Ion Plating Technology: Fundamentals and Applications*. Elsevier.

- Wang, L., Zhao, C., Zhao, L., Fan, X., Wang, Q., & Liu, J. (2022). Effect of O₂/Ar flow ratio and heat treatment on the structure and properties of SiO₂ film prepared by magnetron sputtering. *Physica B: Condensed Matter*, 630, 413537.
- Wang, Y. H., Rahman, K. H., Wu, C. C., & Chen, K. C. (2020). A review on the pathways of the improved structural characteristics and photocatalytic performance of titanium dioxide (TiO₂) thin films fabricated by the magnetron-sputtering technique. *Catalysts*, 10(6), 598.
- Xu, M., Girish, Y. R., Rakesh, K. P., Wu, P., Manukumar, H. M., Byrappa, S. M., & Byrappa, K. (2021). Recent advances and challenges in silicon carbide (SiC) ceramic nanoarchitectures and their applications. *Materials Today Communications*, 28, 102533.
- Yi, P., Zhu, L., Dong, C., & Xiao, K. (2019). Corrosion and interfacial contact resistance of 316L stainless steel coated with magnetron sputtered ZrN and TiN in the simulated cathodic environment of a proton-exchange membrane fuel cell. *Surface and Coatings Technology*, 363, 198-202.
- Zang, D., & Xun, X. (2021). Ceramics coated metallic materials: Methods, properties and applications. *Adv. Ceram. Mater.*
- Zegtouf, H., Saoula, N., Azibi, M., Bait, L., Madaoui, N., Khelladi, M. R., & Kechouane, M. (2020). Influence of substrate bias voltage on structure, mechanical and corrosion properties of ZrO₂ thin films deposited by reactive magnetron sputter deposition. *Surface and Coatings Technology*, 393, 125821.
- Zhang, W., Zhao, X., Sun, Q., Gao, W., Yang, X., & Wang, X. (2023). Optical, electrical and thermal stability properties of Al and F co-doped ZnO thin films prepared by sol-gel spin-coating. *Thin Solid Films*, 139889.
- Zhang, X., Pelenovich, V., Liu, Y., Ke, X., Zhang, J., Yang, B., ... & Wang, X. (2022). Effect of bias voltages on microstructure and properties of (TiVCrNbSiTaBY)N high entropy alloy nitride coatings deposited by RF magnetron sputtering. *Vacuum*, 195, 110710.

Bölüm 13

KAPLAMA YÖNTEMLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

Burak TAŞ¹

Özgün UZ²

Özge TÜZÜN ÖZMEN³



¹ Burak TAŞ, Araştırma Görevlisi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, 0000-0002-9928-5004

² Özgün UZ, Doktora Öğrencisi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, 0000-0002-6752-2861

³ Özge TÜZÜN ÖZMEN, Profesör Doktor, İzmir Bakırçay Üniversitesi,
0000-0002-5204-3737

1. GİRİŞ

1900'lü yıllardan itibaren kademeli bir şekilde ilerleyen teknoloji, 2000'li yıllarda yükselen bir ivme yakalamıştır. Bu gelişimin en önemli ayaklarından biri elbetteki yarıiletken teknolojidir. Elektronikten sağlığa daha birçok alanda kullanılan yarıiletken malzemeler, yaşam koşullarımızı iyileştirmekle birlikte insan bedenindeki problemlere de çözüm üretmektedir. Nano boyuttaki parçacıklarla yapılan çalışmaların hız kazanmasıyla birlikte, bu parçacıkları üretmek, kaplamak vb. konular gündeme gelmiş ve bu alanlara yoğunlaşmıştır.

Kaplama yöntemleri, ilk olarak 1900'lü yılların başından itibaren uygulanmaya başlamıştır. Daha sonra literatürde bu yöntemler üzerine yapılan araştırmaların sayısı artmış ve günümüzde deneysel çalışmalarda sıkça tercih edilecek kadar önemli bir pozisyona sahip olmuştur. Yarı iletken ince film cihazı kaplama işlemi, deneysel ortamlarda en çok çalışılan işlemlerden biridir[1-3]

Bir malzemenin fiziksel ya da kimyasal yapısında değişikliğe gidilerek daha etkin kullanılmasına imkan sağlayan kaplama yöntemleri, yarıiletkenlerle gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılmaktadır. Yarıiletken malzemelerin kaplanmasında en yaygın olarak kullanılan metotlar kimyasal buhar birikimi(CVD), fiziksel buhar birikimi(PVD), elektroçürme teknikleri ve kuvars tüp fırınlardır. Bu metotların tercihindeki en temel kriterler, yüzeylere istenilen kalitede ve özellikle kaplamaların uygulanabilmesidir. Bu kalitenin geliştirilmesiyle birlikte kaplama yöntemlerinin kullanım alanı da genişlemektedir. Örneğin biyomedikal, elektronik, sağlık, hücre ve doku mühendisliği gibi birçok alanda kaplama yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Oke ve arkadaşı, ince film malzemelerinin biriktirilmesinde en çok kullanılan teknikleri, üretilen filmin özelliklerine ve her bir tekniğin avantaj ve dezavantajlarına odaklanarak araştırmışlardır. Bu araştırma sırasında endüstride en yaygın kullanılan kaplama tekniklerinin CVD ve PVD olduğunu gözlemlemişlerdir[4].

Bu çalışmanın 2. bölümünde yarıiletken malzemelerin kaplanmasında sıkça kullanılan CVD, PVD, elektroçürme ve kuvars tüp fırın teknikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. 3. Bölümde ise, çalışmanın genel değerlendirilmesi yapılarak bir sonuca ulaşılmıştır. Ayrıca gelecekte yapılabilecek çalışmalar konusunda fikir yürütülerek tahminde bulunulmuş ve konuyla ilgilenen araştırmacılara önerilerde bulunulmuştur.

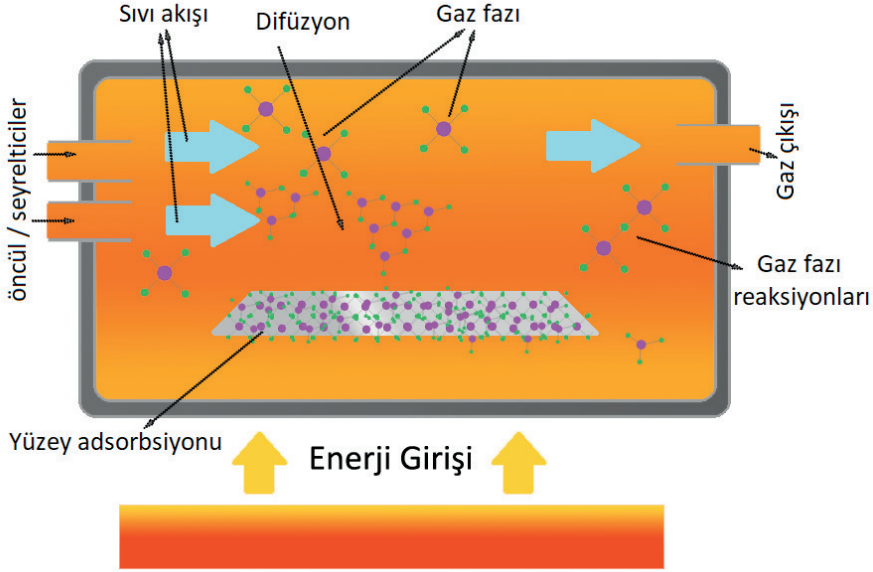
2. KAPLAMA YÖNTEMLER VE UYGULAMA ALANLARI

2.1 Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition - Cvd) Yöntemi

CVD yönteminin tarihçesi eskiye dayansa da 20. yüzyılın başlarında daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. İlk başlarda cam yapımında kullanılan CVD yöntemi, sonraki yıllarda yarıiletken ve metal filmlerinin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yöntemin gelişmesiyle birlikte,

farklı malzemelerin CVD yöntemiyle üretimi ve uygulama alanları da artmıştır. Örneğin son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalardan birinde, kimyasal buhar biriktirme (CVD) metodu kullanılarak alüminyum üzerinde bakır buharı biriktirilmiştir[5]. Bu çalışma havacılık, uzay ve ulaşım gibi daha birçok alanda uygulamalara sahiptir.

CVD yöntemi birçok farklı sektörde geniş kullanım alanına sahiptir. Yarıiletken endüstrisinde, ince film transistörlerin, güneş hücrelerinin ve mikroçiplerin üretimi için CVD yöntemi kullanılmaktadır. Ayrıca, optik kaplamalar, koruyucu kaplamalar, kimyasal sensörler, mikroeletromekanik sistemler(MEMS) ve nanoteknoloji uygulamalarında da CVD yöntemi sıkça tercih edilen bir tekniktir. Bu yöntem, film kalınlığının ve bileşiminin kontrol edilmesi, homojen yapının elde edilmesi ve karmaşık şekillerin kaplanabilmesi gibi avantajlarıyla birçok farklı alanda kullanılmaktadır.

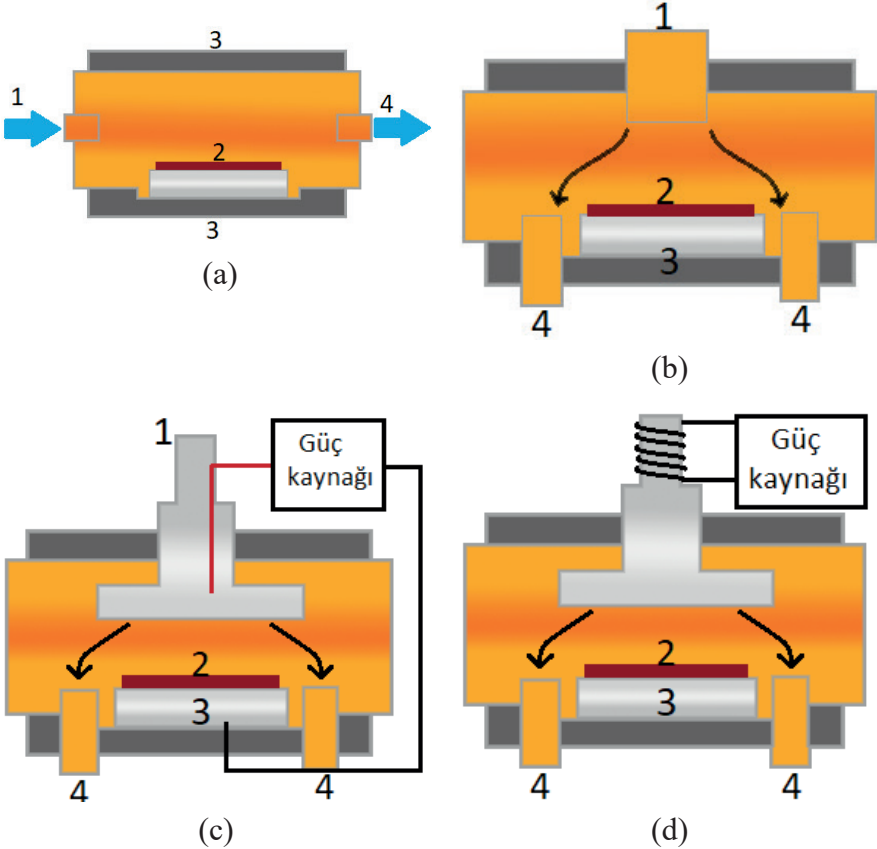


Şekil 1. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) yapısı

CVD yöntemi, ince film kaplama ve malzeme sentezi alanında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, gaz fazında bulunan kimyasalların bir yüzey üzerindeki reaksiyonuyla ince filmler oluşturmayı sağlar. CVD yöntemi, yüksek saflıkta ve tam kontrol altında film oluşturma yeteneği nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir. Örneğin Liu ve arkadaşlarının deneysel olarak yaptıkları bir çalışmada, çok halkalı eğimli deliklere sahip gaz dağıtıcıları ve dikey homojen olmayan ısıtma tasarımına sahip kaplama fırını geliştirmişlerdir ve TRISO kaplı nükleer yakıt parçacı-

ğini başarıyla hazırladıktan sonra akışkan yataklı kimyasal buhar biriktirme (FB-CVD) yöntemini kullanarak kaplama işlemini gerçekleştirmişlerdir [6].

CVD yönteminin uygulama adımları, genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir: İlk adımda, CVD reaktörü hazırlanır ve temizlenir. Reaktör, bir kap içerisinde yer alan bir substrat veya yüzeyi barındıran bir odadan oluşur. Substrat, film kaplanacak olan malzemenin üzerine yerleştirilen bir tabandır. Reaktör içerisindeki atmosfer kontrol edilebilir, bu nedenle oksijensiz veya özel gaz ortamları oluşturulabilir. Ardından, filmi oluşturacak olan kimyasalların gazları reaktöre enjekte edilir. Bu gazlar genellikle bir taşıyıcı gaz içinde bulunur. Taşıyıcı gaz, reaktör içinde gazların taşınmasına ve homojen dağılmasına yardımcı olur. Genellikle inert gazlar (örneğin azot veya argon) taşıyıcı gaz olarak tercih edilir.



Şekil 2. CVD'ye ait (a) yatay sıcak duvar reaktörü, (b) dikey soğuk duvar reaktörü, (c) paralel levha plazma reaktör ve (d) indükleyci tüplü dolaylı plazma reaktör örnekleri

Şekil 2'deki CVD reaktör örneklerinde yer alan elemanlar numaralarına göre;

1. Madde giriş kanalı
2. Substrat
3. Isıtıcı
4. Gaz çıkış kanalları, olarak isimlendirilmektedir[7].

Reaktördeki gazların basıncı ve sıcaklığı kontrol edilerek istenen reaksiyon koşulları sağlanır. Reaktör içerisindeki basınç ve sıcaklık, filmin büyüme hızı, kalınlığı ve diğer özellikleri üzerinde etkilidir. Bu parametreler, film kalitesini ve istenen yapıyı sağlamak için dikkatlice ayarlanmalıdır. Yousefian ve arkadaşı, 100 atm'ye kadar sistem basıncında büyüme kapasitesine sahip yeni bir dikey tip yüksek basınçlı CVD reaktörünün uygulanabilirliğini araştırmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniklerini uygulamışlardır. Bu reaktörün tasarımını iyileştirmek için, oda yüksekliği, sistem basıncı, giriş debisi ve dönüş hızının etkilerini detaylıca incelemiştir [8].

Gazlar reaktör içinde karışır ve yüzeyde bir reaksiyona girer, sonucunda ince bir film oluşur. Reaksiyon, genellikle gaz fazındaki kimyasalların yüzey üzerinde adsorbe olması ve ardından kimyasal tepkimelerle film oluşturması prensibine dayanır. Reaksiyon süresi, film kalınlığına ve istenen bileşime bağlı olarak belirlenir. Safdar ve arkadaşları, Zn/Sn ve Cu/(Zn + Sn) oranları (mol olarak) 1.36 olan bakır ve kalay sülfürleri ve çinko metal tozu içeren bir partikül/çözelti karışımı için reaksiyon süresinin etkisini incelemiştir. Belirli spin kaplama çevrimlerinden elde edilen film kalınlık değerlerinin etkisi de araştırılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda hem çökeltilmiş hem de sertleştirilmiş filmler, yüzey mikro yapısı, bileşimi ve optik özellikleri açısından karakterize edilmiştir[9].

Oluşan film, yüzeyde kimyasal bağlarla bağlıdır ve istenen kalınlığa ve bileşime sahip olması için reaksiyon süresi ve diğer parametreler ayarlanır. Filmin kalınlığı, reaksiyon süresinin yanı sıra kimyasal gazların konsantrasyonu, taşıyıcı gaz hızı ve substrat sıcaklığı gibi faktörlere bağlı olarak kontrol edilir. Ayrıca, filmin bileşimi, reaktöre enjekte edilen kimyasalların türü ve oranıyla belirlenir.

Son olarak, film kaplanmış substrat dikkatlice reaktörden çıkarılır. Çıkarma işlemi, filmin fiziksel olarak zarar görmemesi ve istenen kalınlıkta ve homojenlikte olması için özenle gerçekleştirilir. Film kaplı substrat daha sonra istenen şekillerde kesilebilir veya kullanılacak uygulamaya göre işlenerek tamamlanır. CVD yöntemiyle elde edilen film, yüksek saflıkta, ince ve homojen bir yapıya sahip olabilir, bu da çeşitli endüstriyel uygulamalar için önemli bir avantajdır.

CVD türleri, atmosferik basınçlı(APCVD), alçak basınçlı(LPCVD), metal-organik(MOCVD), plazma destekli(PECVD), Lazerli(LCVD) olmak üzere 5'e ayrılmaktadır.

A. Atmosferik Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme(APCVD)

Atmosferik basınçlı kimyasal buhar biriktirme metodu 800 ila 1000 °C aralığında gerçekleştirilmektedir. Bu metotta istenilen verimin elde edilmesi diğer metotlara göre zayıftır. Bunun da temel nedeni oluşan film kalınlığı her noktada eşit değildir ve pürüz oluşumları gerçekleşmektedir. Bu pürüzler dolayısıyla da yüzey verimi düşük olmaktadır.

B. Düşük Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme(LPCVD)

Düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme metodu avantajlarının çoklğundan dolayı geniş hacimli uygulamalarda gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda çalışılabilir ve enerjisini de sistem mekanizmasına ait ısıdan elde eder. Basıncın düşük olmasından dolayı substratın biriktirme yöntemini bozmadan kullanılacak malzemeye çok yaklaştırmak ve dik tutmak uygun bir çözüm yöntemi olacaktır.

C. Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme(MOCVD)

Normal koşullarda yalıtkan olup, üzerine elektrik akımı, ışık, ısı vb. dış etken temas ettiğinde iletkenlik özelliği gösteren malzemelere yarıiletken bir malzeme denir. Bu malzemeler içerisinde en yaygınları Silisyum ve Germanyum'dur. Silisyumu, grup III(elektron alıcı) ve grup V(elektron verici) elementleriyle katkılamak için yaygın olarak kullanılan metot metal-organik kimyasal buhar biriktirme metodudur. Bu metot aracılığıyla grup III ve grup V elementleri ile katkılı yarıiletken bileşiklerine ait molekül demetleri(epitaksi) yüksek kalitede büyütülebilmektedir. Bu molekül demetleri çoğunlukla gelişmiş cihazların yapısında bulunmaktadır.

D. Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme(PECVD)

Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme metodu kullanılarak, 25 ila 450 °C aralığındaki substrat sıcaklığında, 1 ila 100 Pa aralığındaki basınçta ve elektromanyetik enerji kullanıldığı taktirde 100 kHz -13.6 MHz - 2.56 GHz frekanslarında çalışılabilmektedir.

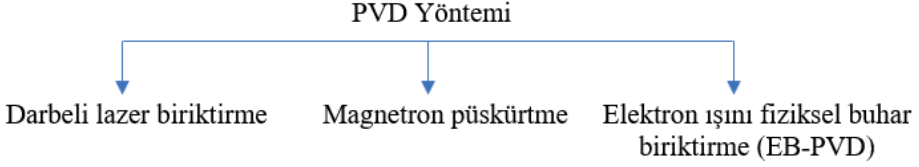
E. Lazer Kimyasal Buhar Biriktirme(LCVD)

Lazer kimyasal buhar biriktirme metodu, 100 ila 1000 Pa basınç aralığında tabakalar üzerine uygulanabilmektedir. Böylece geniş yüzeyler üzerine ince filmlerle kaplama yapılabilmektedir.

2.2 Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition - Pvd) Yöntemi

Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemi, 19. yüzyılın sonlarında ticari ve bilimsel çalışmalarda yer almaya başlamıştır. İlk başlarda genellikle cam, optik

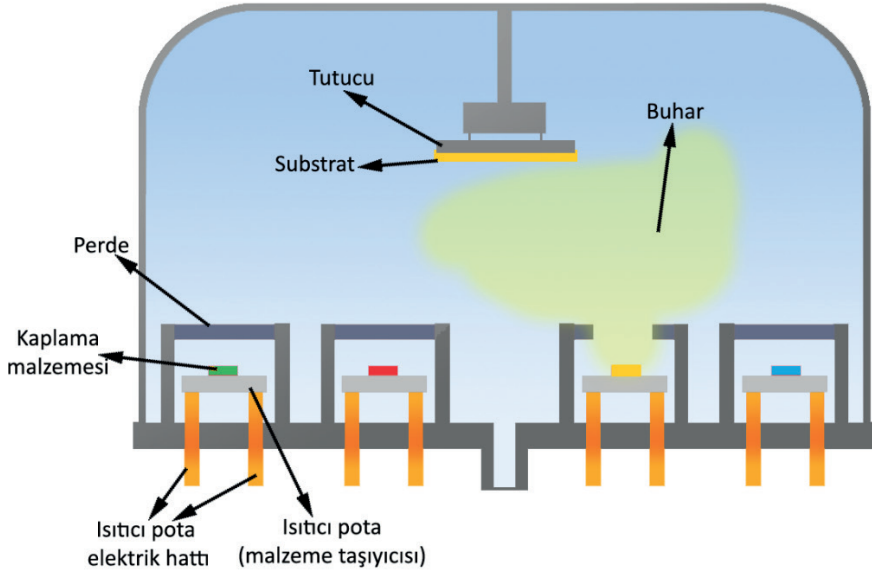
ve elektronik endüstrilerinde kullanılan PVD yöntemi, zamanla metalurji, yarı iletkenler, tıbbi cihazlar ve dekoratif kaplamalar gibi birçok farklı alanda yaygın olarak benimsenmiştir. PVD yöntemi ile yapılan kaplamalar için gerekli olan buhar, rezistans, indüksiyon, katod arkı ve elektron bombardımanı aracılığıyla elde edilir.



Şekil 3. PVD metoduna ait tekniklerin şematik gösterimi

Şekil 3'te , literatürde yer alan çalışmalarda kullanılmış olan PVD metotlarına ait sınıflandırma yer almaktadır. Bu sınıflandırma yapılırken kalite, stokiyometri, fiziksel özellikler, morfoloji, yüksek oranlı vakumlu kaplama yapabilme kapasitesi ve yüksek enerjili elektron ışını kullanabilme kapasitesi gibi özellikler göz önünde bulundurulmuştur. PVD tekniği, yüksek derecede saflığa ve mükemmel kalınlık kontrolüne sahip filmlerin elde edilmesini sağlar ve bu nedenlerle, küçük organik moleküller (düşük molar kütle) için en yaygın biriktirme tekniklerinden biridir. Ayrıca, PVD tekniği, daha yüksek yük taşıyıcı hareketliliği istendiğinde ince film uygulamaları için uygun olmuştur[10].

Reaktif gazlar, uygun hale getirilmiş koşullar altında diğer maddelerle kimyasal reaksiyona girerler. Bu gazlar, Flüor (F), klor (Cl₂) ile hidrojen (H₂) arasındaki reaksiyon, asetilen, metil asetilen, propilen ve vinil klorürdür. Buharlaştırma işlemi için genellikle argon, asetilen ve oksijen gibi reaktif gazlar kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde, ince film elektrolitleri üretmek için döndürerek kaplama ya da daldırmalı kaplama yapmada atomik katman biriktirme (ALD) veya Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) teknolojisinin kullanılabildiği görülmektedir[11]. Bir başka çalışmada modifiye edilmiş bir fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği geliştirilmiş ve tungsten nanopartikülleri, yüksek ve daha düşük basınçlı odalara sahip bir vakum sistemini içeren düşük basınç odasındaki bir substrat veya başka bir toplayıcı üzerinde üretilmiştir[12]. Jekanovic ve arkadaşları, titanyum oksinitridler ve bakır katkılı titanyum nitrür bazlı ince filmlerin üretimini, cam altlığın yüzeyinde farklı PVD tekniklerini kullanarak gerçekleştirmişlerdir[13].



Şekil 4. 4 potalı PVD cihazı şematik gösterimi

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi için temelde 2 farklı teknik uygulanır. Bunlar, buharlaştırma tekniği ve sıçratma tekniğidir. Buharlaştırma tekniğini gerçekleştirebilmek için rezistans, kapasitans, lazer demeti, elektron demeti, ark, süblimasyon ve geniş ışın elemanları ile ayrı ayrı uygulamalar geliştirilmiştir. Sıçratma tekniğinde ise, planar diyot, manyetik alan oluşturma, triyod ve iyon demeti kullanılarak farklı uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu teknikler ışığında fiziksel buhar biriktirme yöntemi, vakumlanmış bir ortamda bulunan malzemelerin buharlaştırılması veya sıçratılmasıyla atomlarının yüzeyden kopartılması sağlanarak kaplanacak malzemenin alt yüzeyinde homojen bir şekilde atomsal ya da iyonik olarak biriktirilmesidir. Bu yüzden de FBB yöntemi ile yapılan kaplamalar çok kaliteli olmaktadır. Kaplama sonrasında yüzeydeki pürüz ile kaplama yapılmadan önceki taban yüzey pürüzü birbirine çok yakındır bu yüzden de kaplandıktan sonra zımparalama vs. gibi tekniklere ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajlarından birisi ise, çevreye zarar verecek herhangi bir oluşumun meydana gelmemesidir.

FBB yöntemi, geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elektronik endüstrisinde, yarı iletkenlerin ve entegre devrelerin üretiminde kullanılır. Optik endüstrisinde, camlara veya mercek yüzeylerine anti-refleks kaplamaların oluşturulmasında kullanılır. Ayrıca, araştırma ve geliştirme çalışmalarında malzeme analizi ve karakterizasyonunda da kullanılabilir. Bunun yanı sıra, endüstriyel uygulamalarda aşınmaya karşı dayanıklı kaplamaların oluşturulması, sürtünme azaltıcı kaplamaların yapılması gibi birçok alanda da kullanımı vardır.

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), yüzey kaplama ve ince film oluşturma işlemleri için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, bir malzeme kaynağından gelen atomlar veya moleküller buharlaştırılır ve ardından bu buhar, hedef yüzey üzerine yoğunlaştırılır. Bu sayede, ince filmler oluşturmak veya yüzeyleri kaplamak mümkün hale gelir.

Fiziksel Buhar Biriktirme'nin uygulama adımları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir: İlk olarak, bir malzeme kaynağı buharlaştırma odasında ısıtılır ve buharlaştırılır. Bu buhar, bir vakum altında tutulan odada bulunan hedef yüzeye yönlendirilir. Buhar molekülleri, hedef yüzeyde yoğunlaşarak ince bir film oluştururlar. Film oluşturulurken, hedef yüzeyin pozisyonu ve malzeme kaynağından gelen buharın yoğunluğu ve akışı gibi parametreler dikkate alınır. Bu adımlar, istenen film kalınlığına ve bileşimine ulaşılan kadar tekrarlanır.

Oluşan film, yüzey üzerinde sabitlenir ve gerektiğinde ilave işlemlerle (örneğin ısı işlem) film özellikleri optimize edilebilir. Fiziksel Buhar Biriktirme yönteminde, farklı film malzemeleri elde etmek için farklı malzeme kaynakları kullanılabilir. Örneğin, bir metal filmi elde etmek için metal bir hedef kullanılırken, bir seramik filmi elde etmek için seramik malzemeleri kullanılabilir. PVD yöntemleri arasında kalite, fiziksel özellikler ve morfoloji gibi parametreler iyi kontrol edilebilmektedir. Bu yüzden de çok bileşenli seramik ince filmlerin imalatında lazer demeti ile buharlaştırma (PLD) büyük ilgi görmüştür

Yöntemin başarısı, malzeme kaynağının buharlaştırma verimliliği, buharın homojen bir şekilde hedef yüzeye ulaşması ve filmin istenen kalınlık ve bileşime sahip olması gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, PVD sisteminin tasarımı ve işletimi önemlidir ve deneyimli operatörlerin dikkatli kontrolünü gerektirebilir.

Tablo 1. CVD ve PVD metotlarına ait çeşitli özellikler ve avantajlı olma durumları.

Parametre	CVD	PVD	Avantaj Durumu
Sıcaklık (°C)	800-100	200-500	PVD ile daha düşük sıcaklıkta kaplama yapılması önemli bir avantajdır.
Kaplama sonrası yüzey	Malzeme yüzeyde değişik oranlarda dağılabilmektedir.	Malzeme yüzeyde homojen dağılmıştır.	PVD metodu ile gerçekleştirilen kaplamadan sonra zımparalama ve parlatma işlemlerine ihtiyaç duyulmaması büyük bir avantajdır.
Piyasadaki tercih edilme durumu	Normal	Yüksek	PVD metodu, düşük sıcaklık ve kaplamadaki homojenliğinden dolayı CVD'den daha avantajlı hale gelmiştir ve bu yüzden daha çok tercih edilmektedir.

Sonuç olarak, fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi, yüzey kaplama ve ince film oluşturma süreçlerinde etkili bir şekilde kullanılan bir yöntemdir. Geniş bir kullanım alanına sahip olan bu yöntem, malzeme özelliklerini geliştirmek, korumak veya özelleştirmek için önemli bir araçtır. Yüksek kaliteli ince filmler elde etmek ve çeşitli endüstrilerde kullanılan ürünlerin performansını artırmak için PVD, tercih edilen bir tekniktir.

2.3 Elektroğirme

Elektroğirme yöntemi, ilk olarak 1934 yılında Antonin Formhals tarafından tanıtılmıştır. Bu süreç sonrasında yöntem, sürekli olarak geliştirilmiş ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmıştır. Başlangıçta, tekstil endüstrisinde elyaf üretimi için kullanılan bir yöntem olarak kabul edilmiş olsa da son yıllarda nanoteknoloji, malzeme bilimi ve biyoteknoloji gibi alanlarda geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Elektroğirme teknolojisi, eğirme solüsyonu bileşenlerini, deneysel koşulları ve işlem sonrası parametreleri değiştirerek tek boyutlu nanoyapılı malzemeler, özellikle nanolifler oluşturmak için basit ve birçok yerde uygulanabilen bir yaklaşımdır. Bu avantajlarından dolayı Fan ve arkadaşları, süper kapasitörler için tek boyutlu nanoyapılı elektrot malzemelerin üretimini gerçekleştirmek amacıyla elektroğirme teknolojisinden faydalanmışlardır[14].

Elektroğirme yöntemi, insan sağlığını ilgilendiren biyomedikal, hücre mühendisliği, doku mühendisliği ve ilaç teslimi gibi uygulamalarda büyük potansiyele sahiptir[15]. Elektroğirme, doku rejenerasyonu için kas mimetik nano lifli iskeleler yapmak için yaygın olarak kullanılan bir üretim tekniğidir. Thangadurai ve arkadaşları, iskelet kası dokularınının 3B biyobaskısındaki güncel yaklaşımları araştırmışlar ve tamamen işlevsel kas yapılarının geliştirilmesine yönelik elektrospinleme ve 3D biyobaskı kombinasyonunu detaylı olarak incelemişlerdir[16]. Bir diğer çalışmada ise Mayoral ve arkadaşları, aortik ark hipoplazisi olan 2 aylık bir kız çocuğunun tıbbi görüntülerine dayanarak ve hesaplamalı modelleme kullanarak hibrit kaynaşık biriktirme modellemesi (FDM) ve elektroğirme teknikleriyle gerçekleştirilmiş 3D biyobaskıya dayalı aort yaması cerrahi onarımı gerçekleştirmişlerdir[17]. Doku mühendisliği projelerinde, elektroğirme ile elde edilen lifler, kemik, kırık veya deri gibi yapay dokuların üretiminde kullanılabilir. Bu elektrospin lifler, biyolojik doku benzeri yapılar oluşturmak için de kullanılabilir ve hücre büyümesini teşvik edebilir. Elektroğirme, nanoliflerin üretiminde de kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca, ilaç teslimi için taşıyıcı olarak kullanılan nanolifler de elektroğirme ile elde edilebilir. Bu yöntem, yüksek seviyede gerilim uygulanan bir polimer çözeltisinin veya eriyiğinin bir iğne ucu veya nozulünden akıtılmasıyla gerçekleştirilir. Yüksek seviyedeki gerilimin etkisiyle, sıvı jetinden ince lifler oluşur ve toplayıcı bir yüzeye yerleştirilir. Böylece, son derece ince ve uzun liflerin üretilmesini sağlar. Genellikle nanometre çapında lifler elde edilebilir. Bu nanolifler, ilaçlar için taşıyıcılar olarak kullanılabilir

ve zamanla kontrollü ilaç salınımını sağlayabilir. Buna ilaveten elektroğirme, filtreleme, sensörler, enerji depolama, tekstil endüstrisi ile hava ve su arıtma gibi birçok başka alanda da kullanılmaktadır.

Elektroğirme yönteminin uygulanma adımları şu şekildedir: İlk adımda, polimer çözeltisi veya eriyiği hazırlanır. Daha sonra, polimer çözeltisi veya eriyiği bir iğne ucu veya nozulüne yerleştirilir. Üçüncü adımda, yüksek seviyede gerilim uygulanır ve polimer çözeltisi veya eriyiği akıtılır. Bu gerilimin etkisiyle, sıvı jetinden ince lifler oluşur. Son adımda, lifler bir toplayıcı yüzeye yerleştirilir ve istenen şekli alması için düzenlenebilir. Bu adımlar, elektroğirme yönteminin temel işleyişini tanımlar, ancak daha karmaşık uygulamalarda kullanabilmek için ek adımlar da gerekebilir.

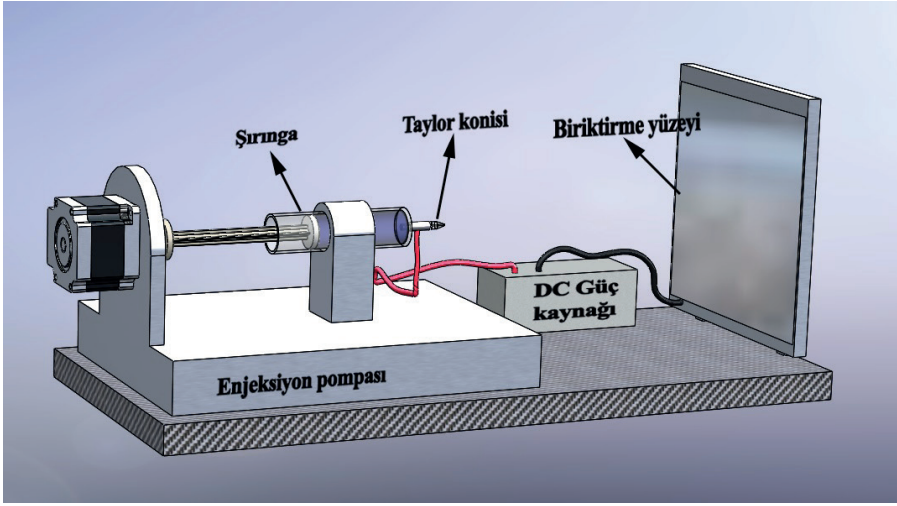
Liflerin karakterizasyonu ve uygulamaları önemlidir. Bu liflerin morfolojisi, çapı, dağılımı, mekanik özellikleri ve yüzey yapısı gibi parametrelerin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu analizler genellikle elektron mikroskopu, mikrometre ölçüğünde çap ölçümü, tensometre veya mikroskopi gibi tekniklerle gerçekleştirilir.

Malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanlarında elektroğirme, sensörler, filtreler ve enerji depolama cihazları gibi birçok çalışma alanı için önemli bir yöntemdir. Örneğin, elektriksel iletken lifler elektrot malzemeleri olarak kullanılabilir. Böylece güç üretimi veya enerji depolama cihazlarına entegre edilebilir. Ayrıca, elektroğirme ile üretilen nanolifler, filtreleme sistemlerinde kullanılarak hava ve su arıtma süreçlerinde etkin bir şekilde faydalanılmaktadır.

Tablo 2. Elektroğirme yönteminin avantajları ve dezavantajları.

Avantajları	Dezavantajları
Yüksek yükleme kapasitesi	Stabil olmayan jet oluşumu
Yüksek enkapsülasyon etkinliği	Birçok parametrenin lif oluşumunu ve yapısını önemli ölçüde etkilemesi
Uygulama kolaylığı	
Çoğu sentetik ve doğal polimer ile çalışma imkanı	
Birkaç nanometreden mikrometreye kadar değişen boyutlarda lif eldesi	
Mekanik olarak dayanıklı ve esnek lif eldesi	
Tek tür lif elde edildiği için saflaştırma işlemine gerek duyulmaması	
İki ya da üç boyutlu lif eldesi	
Birkaç santimetreden metre boyutlarına kadar oldukça uzun lif eldesi	
Düşük maliyet	

Elektroğirme yönteminin temel bileşenleri: yüksek elektrik kaynağı, içerisinde etkin çözeltinin yer aldığı enjektör, metal kolektör ve enjektör pompasıdır. Şekil 4, bu temel bileşenlerin elektroğirme sistemindeki bağlantı yapısını göstermektedir.



Şekil 5. Elektroerozyon yöntemindeki temel bileşenlere ait bağlantı yapısı

Elektroerozyon teknikleri temelde 4'e ayrılmaktadır:

1. Tuzla yıkama elektroerozyon,
2. Ortak elektroerozyon,
3. Hava empedansı elektroerozyon,
4. Kriyojenik veya soğuk plaka elektroerozyon[18].

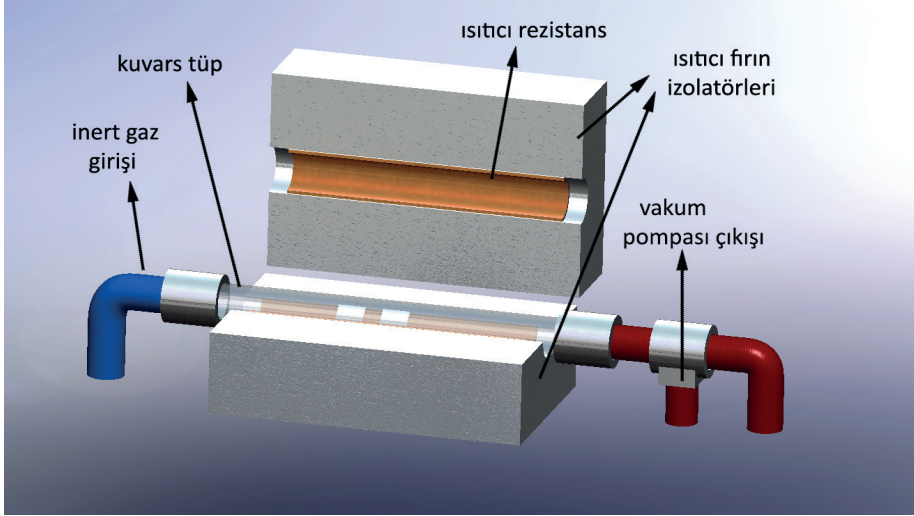
Sonuç olarak elektroerozyon yöntemi, nanoliflerin üretimi için güçlü bir araçtır ve geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. Teknolojik ilerlemeler açısından çok kritik olan biyomedikal, malzeme bilimi, nanoteknoloji ve çevre teknolojileri gibi alanlarda uygulamaları bulunmaktadır. Sürekli olarak geliştirilen bu yöntem, gelecekte daha fazla yenilikçi uygulama alanlarına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılmasını sağlayacaktır.

2.4 Kuvars Tüp Fırın

Kuvars tüp fırın ile kaplama yapma yönteminin tarihçesi oldukça eskilere dayanmaktadır. İlk olarak 1960'larda geliştirilen bu yöntem, o zamandan beri sürekli olarak geliştirilmiş ve iyileştirilmiştir. Bu teknik, başlangıçta cam ve seramik endüstrilerinde kullanılmaya başlanmış, daha sonra yarı iletken endüstrisi ve optik kaplamalar gibi birçok farklı sektöre yayılmıştır. Li ve arkadaşları, biyokütlenin oksidatif hızlı pirolizi kuvars tüp akışkan yataklı bir reaktörde gerçekleştirmişlerdir ve biyokütlenin oksijen eşdeğerlik oranına (ER) etkisi ile biyokömür ve biyo-yağ bileşimi üzerindeki etkisini derinlemesine analiz etmişlerdir[19]. Morzan ve arkadaşları, atomizasyon hücreleri olarak nikel tüpler (NiT) ve kuvars tüpler (QT) kullanarak termosprey alev

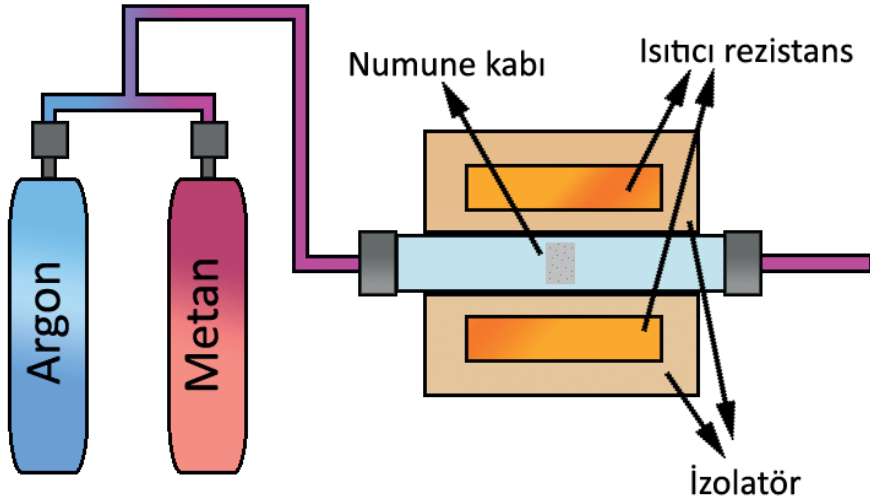
fırını atomik absorpsiyon spektrometrisi (TS-FF-AAS) ile altını belirleyebilecek yeni bir analitik prosedür geliştirmişlerdir[20]. Günümüzde ise kaplama işlemlerinde sıklıkla tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kuvars tüp fırın ile kaplama yapma yöntemi, geniş bir kullanım alanına sahiptir. İlk olarak cam endüstrisinde kullanılmış olup cam yüzeylerin dayanıklılığını artırma, optik kaplamalar yapma veya renkli kaplamalar uygulama amacıyla kullanılır. Gaz giderme, döküm veya alaşımlama için eritme, seramiklerin sinterlenmesi, seramiklerin, camın ısıtılması, seramik hammaddelerin sırlanması/ısıtılması ile cam gövde üretimi amacıyla da kullanılmıştır. Ayrıca, yarı iletken endüstrisinde de mikroçiplerin kaplamasında, güneş panellerinin üretiminde ve enerji depolama sistemlerinde kullanılmaktadır. Bahsi geçen çalışma alanlarına ilaveten bu yöntem, son yıllarda özellikle metalurji, tıp ve elektronik gibi birçok farklı alanda da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.



Şekil 6. Argon taşmalı kuvars tüp fırının şematik gösterimi

Kuvars tüp fırın ile kaplama yapmak, yüzeylere ince ve homojen bir katman uygulamak için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, yüksek sıcaklıklarda eriyen kaplama malzemelerinin kuvars tüp fırın içerisinde ısıtılıp buharlaştırılması ve ardından istenen yüzeye kondense edilmesi prensibine dayanır. Ayrıca farklı birçok endüstriyel alanda da yaygın olarak kullanılabilen etkili ve hassas bir kaplama yöntemidir. Kuvars tüp fırınlar genellikle mullit veya yeniden kristalleştirilmiş alümina (RCA), kuvars cam veya paslanmaz çelik ya da Inconel denilen metaller gibi bir seramik malzemeden yapılmış iş tüpleriyle çalıştırılır.



Şekil 7. Argon veya metan gazı kullanan tüp fırının şematik görünümü

Kuvars tüp fırın ile kaplama yapabilmek için belirli adımları takip etmek gerekmektedir. İlk olarak, kaplanacak yüzey temizlenir ve hazırlık işlemleri tamamlanır. Bu adım, yüzeyin kusurlardan arındırılması, yağdan arındırılması ve gerektiğinde pürüzsüzleştirilmesi gibi işlemleri içerir. Temiz bir yüzey, kaplamanın düzgün ve homojen bir şekilde yapışmasını sağlar. Daha sonra, kaplama malzemesi, kuvars tüp fırın içerisinde yüksek sıcaklıklarda ısıtarak buharlaştırılır. Bu buhar, bir taşıyıcı gazla birlikte kaplanacak yüzeye yönlendirilir ve orada kondense olur. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra, kaplanan yüzey istenilen kalınlıkta ve özelliklerde bir kaplamaya sahip olur. Bu adımlar, genellikle hassas bir kontrol sistemi kullanılarak gerçekleştirilir ve kaplama malzemesinin cinsine ve uygulama amacına göre optimize edilir. İkinci adımda, kaplama malzemesi kuvars tüp fırın içinde yüksek sıcaklıklarda ısıtılır ve buharlaştırılır. Kuvars tüp fırın, kaplama malzemesinin kontrollü bir şekilde buharlaşmasını sağlar. Buharlaşma işlemi, malzemenin atomik seviyede ayrışmasını ve yüzeye daha iyi yapışmasını sağlar. Üçüncü adımda, buharlaşan kaplama malzemesi taşıyıcı gazla birlikte kaplanacak yüzeye yönlendirilir. Taşıyıcı gaz, buharlaşan malzemeyi taşır ve yüzey üzerinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu adım, kaplamanın daha iyi bir kapsama sağlaması ve istenilen kalınlıkta bir kaplamanın oluşması için önemlidir. Dördüncü adımda, buharlaşan kaplama malzemesi kaplanacak yüzeye ulaştığında, yüzeyde kondense olur. Kondense olan kaplama malzemesi, yüzeyde istenilen kalınlıkta bir kaplama tabakası oluşturur. Bu adım, kaplamanın homojen ve pürüzsüz bir şekilde yüzeye yapışmasını sağlar. Son adımda ise, kaplama işlemi tamamlanır. Ancak ihtiyaç duyulursa kaplanan yüzey, kaplama işleminden sonra da bazı işlemlere tabi tutulabilir. Bu işlem-

ler, kaplamanın sertliğini artırmak, yapışma özelliklerini iyileştirmek veya renk ve parlaklık gibi özellikleri ayarlamak vs. olarak sıralanabilir.

Erimiş kuvars tüp ve tüp, doğal olarak oluşan kuvars kristallerinin kaynaştırılması veya eritilmesiyle yapılır. Kullanılan kristaller çok yüksek safliktadır. Bu işlem 3632°F veya 2000°C'de gerçekleşir. Kuvars tüp ile cam tüp arasındaki fark incelendiğinde, amorf bir madde olarak cam rastgele bir moleküler yapıya sahipken, kuvars simetrik bir moleküler yapıya sahiptir. Kuvars, cama kıyasla daha fazla sıcaklık ve basınca maruz kalabilir. Elektriksel amaçlar için hem kuvars hem de cam kullanılır; cam bir yalıtıcıdır, kuvars ise bir iletkenidir.

Tüp fırının avantajları ele alındığında, tüp fırınların en önemli faydası, eşsiz termal homojenliğidir. Sıcak bölgedeki iş parçaları, tam 360° ekseni boyunca 1800°C'ye (3272°F) kadar sürekli sıcaklıklara tabi tutulabilmektedir.

3. SONUÇ

Yarıiletken malzemeler, teknolojik ilerlemede en önemli paya sahip olan elektronik, biyomedikal, doku ve hücre mühendisliği gibi alanlarda yoğun şekilde kullanılmaktadır. Bu yüzden yarıiletken bir malzemenin kaplanması, birden fazla alanda ilerlemeye katkıda bulunabilir. Kaplama teknikleri detaylı olarak ele alındı. Sonuç olarak kuvars tüp fırın ile kaplama yapma yöntemi diğer yöntemlerle kıyaslandığında, yüzeylere istenilen kalitede ve özellikte kaplamaların yapılabilmesi konusunda diğer yöntemlerden daha etkili olduğu sonucuna varıldı. Ayrıca kullanılan kristallerin çok yüksek saflıkta ve kuvarsın iletken özellikte olması onu etkili bir yöntem kılmıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, mevcuttaki kaplama yöntemlerine yenilerinin de eklenmesiyle hem daha verimli hem de daha çeşitli malzemeler üretilebilecek böylece teknolojik gelişim ivmesi daha da artacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Rajendran, K. (1992). Application of an expert knowledge-based system to the semiconductor thin film device coating process. *Computers in industry*, 20(3), 271-274.
- [2] Kim, C., Sul, J., & Moon, J. H. (2023). Semiconductor process fabrication of multiscale porous carbon thin films for energy storage devices. *Energy Storage Materials*, 57, 308-315.
- [3] Timoumi, A., Alameer, O. O., & Alamri, S. N. (2023). Intensive study of coating multilayer TiO₂ nanoparticles thin films used for optoelectronics devices. *Results in Materials*, 18, 100390.
- [4] Oke, J. A., & Jen, T. C. (2022). Atomic layer deposition and other thin film deposition techniques: from principles to film properties. *Journal of Materials Research and Technology*.
- [5] Walke, S., Mandake, M. B., Naniwadekar, M., Tapre, R. W., Ghosh, T., & Qureshi, Y. (2023). A review on copper chemical vapour deposition. *Materials Today: Proceedings*.
- [6] Liu, M., Liu, R., Liu, B., & Shao, Y. (2015). Preparation of the coated nuclear fuel particle using the fluidized bed-chemical vapor deposition (FB-CVD) method. *Procedia engineering*, 102, 1890-1895.
- [7] Varol Z. (2014) Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler ABD, 7 Aralık 2014, Ankara.
- [8] Yousefian, P., & Pimputkar, S. (2021). Computational fluid dynamics modeling of a new high-pressure chemical vapor deposition reactor design. *Journal of Crystal Growth*, 566, 126155.
- [9] Safdar, A., Islam, M., Akram, M. A., Mujahid, M., Khalid, Y., & Shah, S. I. (2016). Reaction time and film thickness effects on phase formation and optical properties of solution processed Cu₂ZnSnS₄ thin films. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 457-465.
- [10] Fernandes, J. D., Macedo, W. C., Vieira, D. H., Furini, L. N., & Alves, N. (2023). Determination of the supramolecular arrangement of Dinaphtho [2, 3-b: 2', 3'-f] thieno [3, 2-b] thiophene films fabricated by Physical Vapor Deposition and possible implications for electronic devices. *Thin Solid Films*, 772, 139808.
- [11] Liang, F., Yang, J., Zhao, Y., Zhou, Y., Yan, Z., He, J., ... & Han, M. (2022). A review of thin film electrolytes fabricated by physical vapor deposition for solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [12] Bai, H., Maxwell, T. L., Kordesch, M. E., & Balk, T. J. (2023). Physical vapor deposition and thermally induced faceting of tungsten nanoparticles. *Materials Characterization*, 198, 112724.
- [13] Jokanović, V., Bundaleski, N., Petrović, B., Ferarra, M., Jokanović, B., Živković,

- S., & Nasov, I. (2022). Detailed physico-chemical characterization of the multilayered thin films based on titanium oxynitride and copper doped titanium nitride obtained by different PVD techniques. *Vacuum*, 195, 110708.
- [14] Fan, P., Ye, C., & Xu, L. (2023). One-dimensional nanostructured electrode materials based on electrospinning technology for supercapacitors. *Diamond and Related Materials*, 109803.
- [15] Si, Y., Shi, S., & Hu, J. (2023). Applications of electrospinning in human health: From detection, protection, regulation to reconstruction. *Nano Today*, 48, 101723.
- [16] Thangadurai, M., Ajith, A., Budharaju, H., Sethuraman, S., & Sundaramurthi, D. (2022). Advances in electrospinning and 3D bioprinting strategies to enhance functional regeneration of skeletal muscle tissue. *Biomaterials Advances*, 213135.
- [17] Mayoral, I., Bevilacqua, E., Gómez, G., Hmadcha, A., González-Loscertales, I., Reina, E., ... & Valverde, I. (2022). Tissue engineered in-vitro vascular patch fabrication using hybrid 3D printing and electrospinning. *Materials Today Bio*, 14, 100252.
- [18] Rafiq, M., Khan, R. S., Wani, T. U., Rather, A. H., Amna, T., Hassan, M. S., ... & Sheikh, F. A. (2023). Improvisations to electrospinning techniques and ultrasonication process to nanofibers for high porosity: Ideal for cell infiltration and tissue integration. *Materials Today Communications*, 105695.
- [19] Li, B., Song, M., Xie, X., Wei, J., Xu, D., Ding, K., ... & Liu, D. (2023). Oxidative fast pyrolysis of biomass in a quartz tube fluidized bed reactor: Effect of oxygen equivalence ratio. *Energy*, 270, 126987.
- [20] Morzan, E., Piano, O., Stripeikis, J., & Tudino, M. (2012). Evaluation of quartz tubes as atomization cells for gold determination by thermospray flame furnace atomic absorption spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 77, 58-62.

Bölüm 14

HÜCRESEL İMALATTA PARÇA-MAKİNE GRUPLARININ BELİRLENMESİNDE GUSTAFSON KESSEL VE BULANIK C ORTALAMALAR YÖNTEMİNİN ETKİNLİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Murat ŞAHİN¹



¹ Department of Industrial Engineering Celal Bayar University 45140,
Muradiye, Manisa, Turkey, e-posta : sahin.murat@cbu.edu.tr
ORCID: 0000-0003-3173-1749

1. GİRİŞ

Artan rekabet koşulları neticesinde işletmelerin maliyetlerini azaltmak ve müşteri beklentilerini karşılayabilme gereksinimi giderek artmaktadır. Ürün çeşitliliği fazla olan işletmelerde üretimde esnekliği sağlamak amacıyla grup teknolojileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Grup teknolojilerinin önemli bir bileşenini oluşturan hücreli imalat sistemi karlılık ve esneklik açısından önem arz etmektedir. Hücreli imalat sistemi, üretim süreci açısından benzer parçaları ve makineleri, üretim alanının belirli bölgelerinde hücreler halinde gruplar ve her hücreyi yalnızca bir parça grubunu üretecek gibi organize eder. Bu sayede üretimde verimlilik artışı, taşıma sürelerinde ve süreç içi stoklarda azalma gibi avantajlar elde edilir. Sonuç olarak, israflar ortadan kaldırılır ve daha az sürede, daha düşük maliyetli, daha kaliteli ürünler elde edilebilmektedir (Aydoğan, 2020).

Bir üretim tesisinde bir parçanın üretilmesi için çeşitli makinelerde veya tezgahlarda işlem görerek, belirli bir sırada yapılması gereken işlemlerin yerine getirilmesi gerekmektedir. Grup teknolojisi üretim sistemlerindeki dezavantajları ve karmaşıklığı ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilen bir yerleşim düzeni şeklidir (Ülker ve Başaran, 2008). Grup teknolojisi gibi modern imalat sistemleri genellikle benzer ürünler ve makine gruplarını bir araya getirerek, tesis planlaması ve üretim kapasitesi açısından avantaj sağlamaktadır.

Hücreli imalat sistemi grup teknolojilerinin temel yapı taşlarını oluşturmaktadır (Boutsinas, 2013). Ürün çeşitliliğinin fazla olduğu durumlarda üretim açısından benzer özellikleri taşıyan ürünler bir araya getirilerek parça aileleri oluşturulmaktadır. Hücreli imalat yaklaşımında parça ailelerinin işlem göreceği makineler özelliklerine göre hücrelerde gruplandırılarak parça aileleri işlem görecekları makine gruplarına atanırlar. Bu nedenle hücrelerde bulunacak olan makine ve parça gruplarının belirlenmesine yönelik çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir.

Hücreli imalatın sağladığı avantajların yanı sıra parça aileleri ve makine gruplarının oluşturulması ve parça ailelerinin hangi gruplara atanacağını belirlenmesi sorun teşkil etmektedir. Hücreli imalatta kullanılan birçok yöntemin parça makine ilişkisini gösteren 0-1 bir matris aracılığıyla gerçekleştirilmeye çalışıldığı görülmektedir. Burada 0 değeri o parçanın belirtilen makinede işlem görmediğini, 1 değeri ise ilgili makinede işlem

gördüğünü belirtmektedir. Ancak bazı durumlarda parçaların makinelerde işlenme durumları 0 ile 1 den farklı değerler alabilmektedir.

Bu çalışmada parça-makine ilişkilerinin 0 ya da 1 olarak değil, 0 ile 1 arasında değiştiği durumlar için bir karar destek modeli sunulmuştur ve Gustafson Kessel algoritması ile bulanık c ortalamalar yöntemlerinin etkinliği karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan ve ekler bölümünde parça makine ilişki matrisleri verilen bazı test problemleri her iki yöntemle de çözülmüştür.

Performans ölçütü olarak gruplama etkinliği, gruplama indeksi ve hücre dışı parça sayısı dikkate alınmıştır. Bir sonraki bölümde konu ile ilgili literatürde bulunan çalışmalara yer verilirken, Bölüm 3'de çözüm yöntemlerine ilişkin bilgiler sunulmuştur. Bölüm 4'de performans ölçütleri ve test problemleri belirtilirken, 5. bölümde sonuç ve önerilere yer verilmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sağladığı avantajların yanı sıra fiziksel ürün üreten işletmelerde sıklıkla karşılaşılan imalat hücrelerinin oluşturulması birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. İmalat hücrelerinin oluşturulması ile kastedilen şey, hangi makinelerin ve hangi parçaların hangi hücre gruplarına ait olduğunun belirlenmesidir. Hücre yapılarının belirlenmesine ilişkin gelişmeler Neufeld (2015) tarafından sunulan literatür çalışmasında detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu bölümde, çalışmanın konusu ile doğrudan ilişkili olan hücre-makine ailelerinin oluşturulmasına yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalar hakkında bilgi verilecektir.

Chu ve Hayya (1991) hücrelere atanacak olan parça ailelerinin oluşturulması için, bulanık c ortalama yöntemini kullanarak parçaların aile gruplarına ne derecede ait olduklarını belirlemişlerdir. Güngör ve Arıkan (2000) bulanık verilerle parça-makine gruplarının oluşturulması için AHP metodu ve IF-THEN karar kurallarına dayalı bir yöntem geliştirmiştir. Josien ve Liao (2000) parça aileleri ve hücre yapılarının oluşturulması için bulanık c ortalama, bulanık k en yakın komşu yöntemine dayalı iki farklı gruplama yöntemi önermiştir. Al-Ahmari (2002) yine problemin çözümü için bulanık kümeleme yöntemi önermiştir. Li vd. (2007) tarafından bulanık c ortalama yöntemi modifiye edilerek hücre yapılarının oluşturulması için yeni çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Jafari vd. (2013) çalışmasında bulanık c ortalama yöntemi ile parçacık sürü algoritmasına dayalı iki yöntemi, hücre yapılarının oluşturulması

açısından birbirileri ile karşılaştırmıştır. Chattopadhyay vd. (2013), hücresele imalatta kullanılan çözüm yöntemlerinin (yapay sinir ağları ve genetik algoritma) parça-makine aile gruplarını oluşturmadaki etkinliğini inceleyen bir literatür araştırması yapmışlardır. Saeidi vd. (2014), hücre yapılarının makine kapasitesi, üretim hacmi, işlem zamanı, makine maliyeti, operasyon sırası ve alternatif operasyon rotaları altında oluşturulması için çok amaçlı bir matematiksel model önermiştir. Bulanık programlama modeli, çok amaçlı modelin tek amaçlı modele dönüştürülmesinde kullanılmıştır ve genetik algoritma tabanlı sezgisel bir yöntem önerilmiştir. Erozan vd. (2015) alternatif rotaların bulunduğu durumlarda hücre yapılarının oluşturulması için bulanık c ortalama yöntemine dayalı bir algoritma önermiştir. Paydar ve Saidi-Mehrabad (2015) dinamik üretim sistemleri ve parametrelerin bulanık olduğu durumlarda hücre yapılarının oluşturulması için hedefsel programlamaya dayalı bir matematiksel model önermiştir.

Aalaei ve Davoudpour (2015), tedarik zinciri ve dinamik sanal hücresele imalat sistemlerinin tasarımı için iki amaçlı bir programlama modeli sunmuşlardır. Rabbani vd. (2016), çalışanların belirlenmesi ve hücre yüklemesi problemi üzerine çalışmışlardır. Parça-makine aileleri oluşturulurken parçaların makinelerdeki işlem sürelerini de göz önünde bulundurmuşlardır. Bychkov ve Batsyn (2018), yine hücresele imalatta parça-makine aileleri için değişken sayıda grup içeren bir karışık tam sayılı matematiksel model sunmuşlardır. Danilovic ve Ilic (2019), esnek üretim sistemlerinde hücre yapılarının belirlenmesi için literatürde bilinen yöntemlere kıyasla daha etkili yeni bir algoritma önermişlerdir. Güven ve Şimşir (2021) bir mobilya fabrikasında parça-makine ailelerinin belirlenmesine yönelik bazı bulanık kümeleme yöntemleri ve Topsis yöntemini kullanarak bir uygulama gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalar dışında bulanık c ortalamalar yöntemi ve Gustafson Kessel algoritmasının birçok kümeleme probleminde başarı ile uygulandığı bilinmektedir.

Literatür araştırması dikkate alındığında bulanık ortamlarda hücre yapılarının oluşturulması için genellikle bulanık c ortalamalar yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Ancak Gustafson Kessel algoritması gibi farklı gruplama yöntemlerinin hücre yapılarının belirlenmesinde kullanılmadığı görülmüştür. Bu çalışma da Gustafson Kessel algoritması, ve bulanık c ortalamalar kümeleme yöntemleri kullanılarak hücresele imalatta parça makine ailelerinin belirlenmesine yönelik bir karar destek modeli sunulmuştur. İki yöntemin birbirinden temel farkı, kullandıkları uzaklık hesaplama yöntemlerinin

birbirleriyle farklı olmasıdır. Yine bu çalışma kapsamında bu iki yöntemin etkinliklerinin birbirleriyle karşılaştırılması istenmektedir. Bu amaçla en küçüğü 7 parça 3 makine, en büyüğü ise 24 parça 11 makineden oluşan 32 adet yeni test örneği oluşturulmuştur. Bu 32 test örneği kullanılarak kümeleme yöntemlerinin etkinliklerinin karşılaştırılması istenmiştir. Sonraki bölümde çözüm yöntemleri ve karar destek modeli anlatılmaktadır.

3. ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Bu çalışmada ürünlerin makinelerde işlenme durumlarının 0 ya da 1 değerlerini almasının yanı sıra, 0 ile 1 aralığında değerler aldığı durumlarda da çözüm üretebilecek olan yöntemler ele alınmıştır. Literatürde bu tarz çalışmalar her geçen gün daha da artmakta olup, Liao vd. (1996) tarafından sunulan örnek bir parça makine ilişki matrisi Şekil 1'de sunulmaktadır. Belirtilen şekilde matrisin içindeki elemanların değerleri ilgili parçanın belirtilen makinede işlem görme derecelerini göstermektedir. Bu çalışmada hücrelerde makine ve parça ailelerinin belirlenmesine yönelik olarak bulanık c ortalamalar ve Gustafson Kessel algoritmasına dayalı iki farklı kümeleme yöntemini de kullanan bir karar destek modeli sunulmuştur.

<i>Parça/ Makine</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	0	1	0	0	0,7	0	0
2	0	1	0,95	0	0	0	0	1	0,45
3	0	0	0,05	0	0	1	0,3	0	0,55
4	0	0	0	1	0,1	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0,5	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0,4	1	0	0	1
7	1	0	0	1	0	0	1	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	1	0
9	0	0	1	0	0	1	0	0	0

Şekil 1. Liao vd. (1996) tarafından sunulan test örneği parça-makine ilişki matrisi

Önerilen yöntemlerde, ilk aşamada parçalar kümelere ayrılacak olan elemanlar olarak belirlenirken, ürünlerin makinelerde işlenme durumlarına göre parça aileleri belirlenmiş daha sonra ise makineler kümelere ayrılacak

olan elemanlar olarak belirlenmiş ve parçaları işleme durumları da özellikleri olarak varsayılmıştır. Parça ve makine aileleri oluşturulduktan sonra, benzerlikleri yüksek olan parça-makine grupları aynı hücrelere atanmıştır. Sunulan karar destek modelinin ara yüzü Şekil 2'de sunulmaktadır. Şekil 2 (a)'da görüldüğü üzere sunulan modelde iki farklı metotla da kümeleme yapabilmek mümkündür. Önerilen karar destek modeli C# programlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca çözüm yöntemlerini birbirleriyle karşılaştırabilmek adına test problem üretici de modüle eklenmiştir. Şekil 2 (b)'de ise Şekil 1'de verilen test örneği için elde edilen çözümün çıktısının nasıl sunulduğu gösterilmektedir.

(a) Model ara yüzü

Part Groups	
Cell1	: 2 5 8
Cell2	: 1 4 7
Cell3	: 3 6 9
Machine Groups	
Cell1	: 2 5 8
Cell2	: 1 4 7
Cell3	: 3 6 9
Grouping Efficiency	:0,6438
Grouping Index	:0,6770
Total of zero element	:2,2

(b) Çıktı ekranı

Şekil 2. Karar destek modelinin ara yüz gösterimi ve çıktı ekranı.

Devam eden bölümlerde kullanılan bulanık c ortalamalar yöntemi ve Gustafson Kessel algoritmasının detaylı olarak açıklaması yapılmaktadır.

3.1. Bulanık C-Ortalamalar Yöntemi

Kümeleme yöntemlerini sert ve yumuşak kümeleme olarak iki temel grup altında toplanabilmektedir. Yumuşak kümeleme metotlarında verileri kümelerine bölmek için bulanık mantık yöntemleri kullanıldığından bir veri elemanı, sert kümelemedeki gibi kesin olarak sadece bir kümeye ait değildir. Her bir kümeye farklı üyelik derecelerine sahiptirler. Kümelerine üyelik dereceleri belirli bir değer aldığından birçok durumda bulanık kümeleme sert kümeleme yöntemlerinden daha güçlü olabilmekte ve iyi sonuçlar sağlayabilmektedir (Cebeci ve Yıldız, 2015).

Günümüzde bulanık ortamlarda kümeleme işlemlerini daha kolay gerçekleştirebilmek için geliştirilen birçok yöntem bulunmaktadır. Bunların

önemli bir kısmı bulanık c ortalamalar yöntemine dayanmakta olup bu yöntemin daha gelişmiş durumlarını içermektedir. Bu yöntem ilk olarak bulanıklaştırma derecesinin (m) 2 olduğu durumlar için Dunn (1973) ve $m > 1$ için Bezdek (1973) ortaya konulan ve yine Bezdek (1981) tarafından iyileştirilen en popüler bulanık kümeleme algoritmalarından biridir. Nitekim tarım, astronomi, kimya, jeoloji, görüntü işleme, medikal tanı, şekil analizi, hedef tanıma gibi birçok farklı alanda kullanıldığı bilinmektedir (Cebeci ve Yıldız, 2015).

FCM yöntemi eşitlik (1) de verilen amaç fonksiyonu değerini minimize etmeye çalışır.

$$E(U, V) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (u_{ij})^m (x_j - v_i)^T (x_j - v_i) \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de k küme sayısını gösterirken, j eleman sayısını göstermektedir. u_{ij} değeri j . elemanın i . kümeye aitlik derecesini gösterirken (u_{ij} değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir), x_j j . elemanın özellikler vektörünü, v_i ise i . kümenin merkezini belirtmektedir. m ise bulanıklaştırma parametresi olup 1 ile ∞ arasında değer almaktadır (Bu çalışmada m değeri 1,1 alınmıştır).

$$\sum_{i=1}^k u_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de görüldüğü üzere bir elemanın kümelere aitlik dereceleri toplamı 1'e eşit olmalıdır.

Model, Eşitlik (1)'de verilen amaç fonksiyonunu, Eşitlik (2) kısıtını dikkate alarak minimize edecek şekilde çalışmaktadır. Bu işlemi yaparken başlangıçta rassal olarak belirtilen aitlik dereceleri Eşitlik (3) kullanılarak iteratif olarak güncellenir.

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{l=1}^c \left(\frac{\|x_j - v_l\|}{\|x_j - v_i\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (3)$$

Aitlik derecelerinin değişme nedenleri her iterasyonda küme merkezlerinin de Eşitlik (4)'de görüldüğü üzere güncellenmesidir.

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m x_j}{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m} \quad (4)$$

Bu işlem amaç fonksiyonundaki iyileşme derecesinin belirli bir eşik değerinden (Bu çalışmada $\epsilon=0.00001$ alınmıştır) daha fazla olmadığı duruma kadar iteratif olarak tekrarlanır. Son olarak elde edilen aitlik dereceleri elemanların kümelerine olan aitliğini belirtmektedir. Bulanık c ortalamalar yönteminin adımları Şekil 3'de sunulmaktadır.

Girdi: X_{jn} (Eleman özellik matrisi), U_{ij} (rassal başlangıç çözümü), ϵ değeri, m değeri, küme sayısı

Çıktı: Elemanların kümelerine aitlik dereceleri

$l=1,2,\dots, MaxIter$ için Adım (1- 4) **tekrarla**

{

Adım 1: Eşitlik (4)'ü kullanarak küme ortalamalarını hesapla.

Adım 2: Eşitlik (3)'ü kullanarak üyelik değerlerini güncelle.

Adım 3: Eşitlik (1)'i kullanarak E amaç fonksiyonu değerini hesapla.

Adım 4: ($\|E(l)-E(l-1)\|<\epsilon$) doğru ise Adım 5'e git, değilse Adım 1'e git.

}

Adım 5: Üyelik matrisini çıktı olarak kaydet.

Not: $MaxIter$ uygulanabilecek maksimum iterasyon sayısını göstermektedir.

Şekil 3. Bulanık c ortalamalar algoritmasının adımları

Bulanık c ortalamalar yönteminin başlangıcında parçaların kümelerine aitlik dereceleri rassal olarak oluşturulduğu için (U_{ij}) her çalıştırılmasında farklı yerel optimum çözümlerle sonuçlanabilmektedir (Cebeci ve Yıldız, 2015). Bu nedenle bu çalışmada her bir test örneği için algoritmalar 10 kez çalıştırılmış ve en iyi parça-makine grupları dikkate alınmıştır.

3.2. Gustafson Kessel Algoritması

Gustafson ve Kessel (1979) tarafından geliştirilen Gustafson Kessel kümeleme yönteminde, bulanık c ortalamalardan farklı olarak mahalobis uzaklık kullanılmıştır. Bulanık c ortalamalarda ise öklidiyen uzaklık benimsenmektedir. Buna bağlı olarak bulanık c ortalamalar yönteminde oluşturulan kümeler küreseldir ve veri türüne göre küme şekli değişmez. Gustafson Kessel algoritmasında ise küme şekli verilere göre değişebilir ve elipsoidal ve hiper-elipsoidal gibi birkaç farklı biçimde oluşabilmektedir (Sameer vd., 2019). Gustafson Kessel algoritmasında Eşitlik (1)'deki amaç fonksiyonu yerine Eşitlik (5)'de verilen amaç fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$E(U, V) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (u_{ij})^m (x_j - v_i)^T A_i (x_j - v_i) \quad (5)$$

Eşitlik (5)'de verilen amaç fonksiyonunda bulunan A_i değerlerinin hesaplanması Eşitlik (6) ve (7)'de sunulmuştur. Eşitlikteki p değeri elemanların kümelenmesinde dikkate alınan özellik sayısını göstermektedir.

$$A_i = \sqrt[p]{\det(S_i)} \cdot S_i^{-1} \quad (6)$$

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^m (x_j - v_i)(x_j - v_i)^T}{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^m} \quad (7)$$

Bu çalışma kapsamında rassal olarak oluşturulan 32 adet test örneği her iki yöntemle de çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar 4. Bölüm'de belirtilen performans ölçütleri açısından karşılaştırılmıştır.

4. PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ VE TEST PROBLEMLERİ

Hüresel imalatta ürünlerin makinelerde işlenme durumları 0-1 arasında bir sayı olarak belirtilmesine rağmen, ürünlerin bir hücreye kesin olarak atanması gerekmektedir. Bunu sağlamak amacıyla bir eleman, aitlik derecesinin en fazla olduğu hücreye atanmıştır. Kümelemenin etkinliğini ölçmek amacıyla bazı performans ölçütleri dikkate alınmıştır. Bu performans ölçütleri aşağıda belirtilmiştir:

Literatürde yaygın olarak kullanılan gruplama etkinliği (τ) Kumar ve Chandrasekharan (1990) tarafından önerilmiş bir performans ölçütü olup, Eşitlik (8) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\tau = \frac{1 - \frac{e_0}{e_0 + e_d}}{1 + \frac{e_v}{e_0 + e_d}} = \frac{e_d}{B + e_0} \quad (8)$$

Eşitlik (8)'de B blok köşegen alanını, e_0 blok köşegende olmayan elemanlar toplamını, e_d blok köşegende olan elemanlar toplamını ve $e_v (B - e_d)$ değerini göstermektedir.

Bir diğer performans ölçütü olan gruplama indeksi (GI) Nair ve Narendran (1996) tarafından önerilmiş olup, Eşitlik (9) kullanılarak hesaplanabilir.

$$GI = \frac{1 - \frac{q e_v + (1-q)(e_0 - A)}{B}}{1 + \frac{q e_v + (1-q)(e_0 - A)}{B}}, \quad A = \begin{cases} 0 & \text{if } e_0 \leq B \\ e_0 - B & \text{if } e_0 > B \end{cases} \quad (9)$$

Eşitlik (9)'da verilen q değeri 0-1 arasında bir sabit sayıyı göstermektedir.

Şekil 4, Şekil 1'de verilen parça-makine ilişki matrisine uygun olarak gerçekleştirilen kümeleme sonuçlarının matris halinde gösterilmesidir. Belirtilen örnek için bulanık c ortalamalar ve Gustafson Kessel algoritması aracılığıyla parça aileleri $\{2, 5, 8\}\{1, 4, 7\}\{3, 6, 9\}$, makine grupları ise yine $\{2, 5, 8\}\{1, 4, 7\}\{3, 6, 9\}$, şeklinde elde edilmiştir. Bu kümeleme neticesinde Şekil 1'de verilen parça-makine ilişki matrisi tekrar düzenlendiğinde Şekil 4'de sunulan matrise ulaşılmaktadır. Burada matris içinde köşegen üzerindeki dikdörtgenler parça-makine gruplarını göstermektedir. Kesikli çizgilerle koyu olarak belirtilen daireler ise kendi hücresi dışındaki bir makinede işlem görmesi gereken parçaları belirtmektedir. Buradan hareketle e_0 : $(0,95 + 0,45 + 0,10 + 0,40 + 0,30) = 2,2$ hesaplanmaktadır. e_0 değerinin düşük olması hücre yapılarının etkin olduğunun göstergesidir. Yine bu örnek için $B=27$, e_d :18,8 ve e_v :8,2'dir.

Parça/Makine	2	5	8	1	4	7	3	6	9
2	1	0	1	0	0	0	0,95	0	0,45
5	1	0,5	1	0	0	0	0	0	0
8	0	1	1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0,7	0	0	0
4	0	0,1	0	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	1	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0,3	0,05	1	0,55
6	0	0,4	0	0	0	0	0	1	1
9	0	0	0	0	0	0	1	1	0

Şekil 4. Şekil 1’de verilen test örneğinin 3 hücre için makine parça gruplarının kümelendirilmiş halinin ilişki matrisi üzerinde gösterimi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında sunulan bulanık c ortalamalar ve Gustafson Kessel yöntemi C# programında kodlanmıştır. En küçüğü 7 parça 3 makine ve en büyüğü 24 parça 11 makineden oluşan 32 adet test problemi her iki yöntem ile de çözülmüş ve sonuçlar 3 performans ölçütü açısından da değerlendirilerek Çizelge 1’de sunulmuştur. Test problemlerinin parça-makine ilişki matrisleri Ekler bölümünde yer almaktadır. 7 parçalı test örneklerinde her iki algoritmanın da aynı sonuçlara ulaştığı görülmüştür. Performans ölçütlerinden gruplama etkinliği dikkate alındığında Gustafson Kessel algoritmasının 17 örnekte bulanık c ortalamalar yöntemine kıyasla daha iyi kümeleme gerçekleştirdiği belirlenirken, bulanık c ortalamalar yönteminin 6 örnekte üstünlük sağladığı tespit edilmiştir. Gruplama indeksi dikkate alındığında ise Gustafson Kessel algoritması 19 örnekte üstünlük sağlamıştır. e_0 değerleri dikkate alındığında ise yine Gustafson Kessel yönteminin 20 örnekte daha iyi kümeleme gerçekleştirdiği görülmüştür. Bunun yanı sıra 3 performans ölçütü açısından da iki yöntemle elde edilen kümeleme yapıları arasında çok büyük farklılıkların olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 1. Gustafson Kessel algoritması ve bulanık c ortalamalar yönteminin karşılaştırılması.

Test Örneğine İlişkin Bilgiler				Gustafson Kessel Yöntemi			Bulanık-C Ortalamalar Yöntemi		
Örne	Parça	Maki	Hüc	τ	GI	Toplam e_0 Değeri	τ	GI	Toplam e_0 Değeri
k	Numar	ne	re						
1	7	3	2	0,372	0,471	1,75	0,372	0,471	1,75
2	7	3	3	0,408	0,412	2,85	0,408	0,412	2,85

3	7	4	2	0,436	0,482	2,65	0,436	0,482	2,65
4	7	4	3	0,414	0,423	3,45	0,414	0,423	3,45
5	10	5	2	0,426	0,505	3,65	0,426	0,505	3,65
6	10	5	3	0,432	0,405	6,85	0,406	0,408	6,65
7	10	7	2	0,335	0,451	5,00	0,290	0,410	6,45
8	10	7	3	0,413	0,444	6,85	0,393	0,421	7,25
9	13	5	3	0,366	0,404	7,85	0,322	0,369	8,65
10	13	5	4	0,392	0,391	8,40	0,417	0,378	8,80
11	13	6	3	0,375	0,429	8,40	0,388	0,429	8,60
12	13	6	4	0,383	0,375	10,40	0,377	0,359	10,80
13	13	7	3	0,413	0,422	13,05	0,364	0,369	14,85
14	13	7	4	0,324	0,262	18,25	0,317	0,244	18,70
15	17	5	3	0,440	0,447	9,85	0,440	0,447	9,85
16	17	5	4	0,364	0,302	13,75	0,340	0,300	13,85
17	17	7	3	0,386	0,399	14,80	0,386	0,399	14,80
18	17	7	4	0,305	0,261	19,90	0,306	0,278	19,40
19	17	8	3	0,294	0,340	17,35	0,325	0,382	15,20
20	17	8	4	0,361	0,323	18,05	0,264	0,261	20,70
21	19	6	4	0,430	0,422	12,40	0,410	0,401	13,00
22	19	6	5	0,400	0,337	15,00	0,355	0,300	16,00
23	19	8	4	0,335	0,327	22,60	0,333	0,335	22,20
24	19	8	5	0,322	0,230	26,20	0,308	0,216	26,80
25	19	10	4	0,278	0,283	29,55	0,284	0,261	30,50
26	19	10	5	0,298	0,242	31,05	0,235	0,156	35,35
27	24	7	3	0,300	0,336	23,60	0,300	0,343	23,15
28	24	7	4	0,321	0,318	24,55	0,303	0,255	27,40
29	24	9	3	0,291	0,346	26,00	0,278	0,334	26,95
30	24	9	4	0,326	0,342	26,40	0,338	0,329	27,20
31	24	11	3	0,314	0,347	32,65	0,264	0,336	33,60
32	24	11	4	0,325	0,300	36,20	0,289	0,282	37,80

Not: Koyu değerler ilgili performans ölçütü için bulunan en iyi değeri göstermektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada esnek imalat sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan hücre yapılarının oluşturulması amacıyla bulanık c ortalamalar ve Gustafson Kessel algoritmalarının etkinliği karşılaştırılmıştır. Gustafson Kessel algoritmasının bulanık c ortalamalar yöntemine kıyasla daha etkili olduğu görülmüştür. İlerleyen çalışmalarda kümeleme yöntemlerinin yanı sıra son zamanlarda geliştirilen sezgisel algoritmaların ilgili problem üzerindeki etkinliğinin araştırılmasının literatüre katkı sağlayacağı bilinmektedir. Ayrıca elde edilen parça-makine ailelerinin gruplama indeksi ve gruplama etkinliği dışında farklı performans ölçütleri açısından değerlendirilmesinin de faydalı olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Aalaei, A., Davoudpour, H. (2016). Revised multi-choice goal programming for incorporated dynamic virtual cellular manufacturing into supply chain management: A case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 47, 3-15.
- Al-Ahmari, A. M. A. (2002). A fuzzy analysis approach for part-machine grouping in cellular manufacturing systems. *Integrated Manufacturing Systems*, 13 (7), 489-497.
- Aydoğan S., (2020) Bir otomotiv yan sanayi işletmesinde hücreli üretim sistemi tasarımı ve çok amaçlı çizelgeleme problemi çözümü, *Yüksek Lisans Tezi*, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi.
- Bezdek, J.C. (1973). Fuzzy Mathematics in Pattern Classification, *PhD Thesis*, Cornell University, Ithaca, NY.
- Bezdek, J.C (1981). Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA (ISBN:0306406713).
- Boutsinas, B. (2013). Machine-part cell formation using biclustering. *European Journal of Operational Research*, 230 (3), 563-572.
- Bychkov, I., Batsyn, M. (2018). An efficient exact model for the cell formation problem with a variable number of production cells. *Computers and Operations Research*, 91, 112-120.
- Chattopadhyay, M., Sengupta, S., Ghosh, T., Dan, P.K., Mazumdar, S. (2013). Neuro-genetic impact on cell formation methods of Cellular Manufacturing System design: A quantitative review and analysis. *Computers & Industrial Engineering*, 64(1), 256-272.
- Cebeci, Z., Yıldız, F. (2015). Bulanık C-ortalamalar Algoritmasının Farklı Küme Büyüklükleri İçin Hesaplama Performansı ve Kümeleme Geçerliliğinin Karşılaştırılması. 9. Ulusal Zootekni Bilim Kongresi, 3-5 Eylül 2015, Konya – Türkiye. *Bildiriler Kitabı*, s. 227-239.
- Chu, C. H., & Hayya, J. C. (1991). A fuzzy clustering approach to manufacturing cell formation. *The International Journal of Production Research*, 29 (7), 1475-1487.
- Danilovic, M., Ilic, O. (2019). A novel hybrid algorithm for manufacturing cell formation problem. *Expert Systems With Applications*, 135, 327-350.
- Dunn, J.C. (1973). A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and Its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters. *J. Cybernetics*, 3 (3): 32-57.

- Erozan, İ., Ustun, O., & Torkul, O. (2015). An Improved Fuzzy C-Means Algorithm for Cell Formation Problems with Alternative Routes. *International Journal of Fuzzy System Applications (IJFSA)*, 4(4), 15-30.
- Güngör, Z., & Arıkan, F. (2000). Application of fuzzy decision making in part-machine grouping. *International Journal of Production Economics*, 63 (2), 181-193.
- Güven, İ., & Şimşir, F. (2021). Machine-Part Formation for Cellular Manufacturing in Group Technology: An Application for Furniture Company. *Sakarya University Journal of Science*, 25(2), 466-483.
- Gustafson, D.E. & Kessel, W.C., (1979). Fuzzy Clustering with a Fuzzy Covariance Matrix. *IEEE CDC San Diego*, 761-766.
- Jafari, H., Soltani, A., & Soltani, M. (2013). Measuring the performance of FCM versus PSO for fuzzy clustering problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 4(3), 387-392.
- Josien, K., & Liao, T. W. (2000). Integrated use of fuzzy c-means and fuzzy KNN for GT part family and machine cell formation. *International Journal of Production Research*, 38 (15), 3513-3536.
- Li, J., Chu, C. H., Wang, Y., & Yan, W. (2007). An improved fuzzy clustering method for cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, 45(5), 1049-1062.
- Liao, T. W., Chen, L. J., Chen, Z. H. & Coates, E. R. (1996). A comparison of two approaches for designing line type cellular manufacturing systems. *Integrated Manufacturing Systems*, 7, 6-15.
- Nair, G. J. K., & Narendran, T. T. (1996). Grouping index: a new quantitative criterion for goodness of block-diagonal forms in group technology. *International Journal of Production Research*, 34(10), 2767-2782.
- Neufeld, J. S., Gupta, J. N., & Buscher, U. (2016). A comprehensive review of flowshop group scheduling literature. *Computers & Operations Research*, 70, 56-74
- Paydar, M. M., & Saidi-Mehrabad, M. (2015). Revised multi-choice goal programming for integrated supply chain design and dynamic virtual cell formation with fuzzy parameters. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(3), 251-265.
- Rabbani, M., Akbari, E., Dolatkhah, M. (2017). Manpower allocation in a cellular manufacturing system considering the impact of learning, training and

combination of learning and training in operator skills. *Management Science Letters*, 7, 9-22.

- Saeidi, S., Solimanpur, M., Mahdavi, I., & Javadian, N. (2014). A multi-objective genetic algorithm for solving cell formation problem using a fuzzy goal programming approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70 (9-12), 1635-1652.
- Sameer, F. O., Abu Bakar, M. R., Zaidan, A. A., & Zaidan, B. B. (2019). A new algorithm of modified binary particle swarm optimization based on the Gustafson-Kessel for credit risk assessment. *Neural Computing and Applications*, 31, 337-346.
- Suresh Kumar, C., & Chandrasekharan, M. P. (1990). Grouping efficacy: a quantitative criterion for goodness of block diagonal forms of binary matrices in group technology. *International Journal of Production Research*, 28(2), 233-243.
- Ülker, Y., & Başaran, B. (2008) Bir Grup Teknolojisi Modeli Olarak Hücreyel İmalat Sistemi ve Faaliyet Tabanlı Maliyetleme Sistemiyle Bütünleştirilmesi. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (32), 152-163.

EKLER

Ek 1. Test örneklerinin parça-makine ilişki matrisleri.

ParçaSayısı: 7						
MakineSayısı: 3						
0	0,9	0,85	0	0,4	0,4	0,2
0,95	0,6	0	0	0	0,05	0
0	0,8	0,4	0,15	0,22	0,35	0,6

ParçaSayısı: 7						
MakineSayısı: 4						
0,6	0	0,8	0,6	1	0,4	0,4
0,8	0	0,8	0,2	0	0,4	0
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0
0,95	0,6	0	0	0	0,05	0

ParçaSayısı: 10									
MakineSayısı: 5									
0,4	0,4	0,6	0	0,6	0	0,6	0,8	0,2	0
0,4	0	0,8	0,2	0	0	0,8	0	0,8	0
0,8	0	0	0,2	0,8	0,4	0	0	0	0,8
0,4	0	1	0	0,4	0,25	0	0,8	0	0
0,4	0,6	0,6	0,2	0,2	0	0	0,6	0,6	0,2

ParçaSayısı: 10									
MakineSayısı: 7									
0	0	0,6	0,4	0	0	0	0,4	0,8	0
0,2	0,8	0,4	0,2	0,2	0	0,8	0,8	0	0
0,8	0,2	0	0	0,8	0	0,6	0	0,95	0
0,2	0,4	0	0	0	0,4	0,8	0,6	0	0,4
0	0,8	0,95	0,6	0	0	0	0,05	0	1
0	0	0	0,2	0	0	0	0	0,8	0
0,6	0	0	0,8	0	0,6	0,4	0	0	0,2

ParçaSayısı: 13												
MakineSayısı: 5												
0	0,2	0	0,75	0,8	0	0,2	0	0,6	0	0	0,6	0
0,4	0,8	0,4	0	0	0,4	0	0,6	0,2	0,95	0,4	0	0
0	0,6	0,4	0,8	0,6	0	0,8	0	0	0	0,8	0,2	1
0,4	0	0,4	0,2	0	0	0,8	0,6	0	0	0	0,8	0
0	0,25	0	0	0	0,2	0,2	0,8	0	0,4	0,2	0,4	1

ParçaSayısı: 13

MakineSayısı: 6

0	0	0,8	0,6	0,4	0	0,2	0,6	0,6	0,6	0,8	0	0,2
0,8	0,6	0	0	0	0,6	0	0,8	0	0	0	0,8	0
0	0	0,2	0	0,8	0	0	0,2	0,2	0,8	0	0	0
0,8	0,6	0,6	0,2	0,8	0	0	0	0	0	0,8	0	0
0	0,2	0,2	1	0	0	0	0	0,4	0,4	0,6	0,6	0
0	1	0	0	0,6	0,6	0,4	0,8	0,2	0	0,8	0,2	0,4

ParçaSayısı: 13

MakineSayısı: 7

0	0	0,6	0,8	0	0,75	0	0,8	0,2	0,2	0,9	0	0,4
0,4	1	0,2	0	0,6	0,8	0	0	0,4	0,4	1	0	0
0,2	0	0,4	0,6	0,8	0,6	0,8	0,2	0,2	0,8	0	1	0,2
0,4	1	0,6	0,8	0	0,2	0	0	0	0	0,8	0	0
0,4	0	0,4	0,6	0,8	0	0	0	0,6	0,4	0,4	0,6	0,4
0	0,8	0,6	0,2	0	0,4	0,8	0,8	0	0,2	0,6	0,6	0
0,4	0	0	1	0	0	0	0,4	0	0,4	0	0,6	0,8

ParçaSayısı: 17

MakineSayısı: 5

0,2	0	0,8	0	0,2	0	0,6	0	0,6	0	0	0,4	0,8	0,4	0,2	0	0,2
0,6	0,2	0,2	0,6	0,8	0	0	0	0,4	0,4	0	0,2	0	0	0,6	0,8	0,8
0	0,4	0	0	0	0,4	0,85	0	0,8	0,4	0,4	0,6	1	0,2	0,8	0,6	0
0,4	0,6	0,9	0,9	0	0,2	0	0,2	0	0	0,4	0,4	0	0,75	0	0,25	0,4
0,6	0,4	0	0,2	0	0	0,8	0,2	0	0,6	0	0,2	0	0	0,2	0,2	0,8

ParçaSayısı: 17

MakineSayısı: 7

0,4	0,4	0,6	0	0	0,8	0	1	0,8	0	0	0,6	0	0	0,2	0,6	0,8
0,4	0	0,8	0	0	0,8	0	0	0,8	0	0	0,6	0,2	0,8	0,6	0	0,4
0,4	0	0	0	0	0,6	0,9	0	0,6	0,2	0	0	0	0,8	0,4	0,2	0
0	0	0	0,8	0	0	0	0,4	0,8	0	0	0,4	0	0,4	0,8	0	0
0	0	0	0,8	0	0	0,4	0,2	0,6	0,4	0,6	0	0,4	0,4	0,6	0,6	0,2
0	0,6	0,9	0,6	0	0	0,8	0	0	0,6	0,2	0,6	0,6	0	0,2	1	0,4
0	0	0,6	0	0	0	0,8	0,2	0,4	0,2	0,2	0,4	0	0	1	0	0

ParçaSayısı: 17

MakineSayısı: 8

0	0	0	1	0,8	0,2	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0,4
0	0,2	0	0	0,8	0,4	0	0	0	0,6	0	0,4	0,8	0	0	0,4	0
0	0,2	0,4	0	0,6	0,6	0	0	0,85	0	0	0,4	0	0	0,2	0,2	0,6
0	0	0	1	0,2	0,9	0,2	1	0	0	0	0,6	0	0	0,8	0,2	0,8
0	0,2	0	0	0	0,4	0	0	0	0,6	1	0,4	0,8	0	0,2	0	0,6
0,2	0,2	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0,8	0	0	0,8	0	0
0,6	0	0,6	0	0,8	0,2	0,8	0	0	0	0	0,6	0,9	0	0	0,8	0,5
0,2	0	0,4	0	0,6	0,6	0,4	0	0,4	0,2	1	0	0	0	0,2	0	0,25

ParçaSayısı: 19
MakineSayısı: 6

0,4	0,8	0,8	0,4	0	0	0,8	0,4	0,6	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0,8
0,8	0	0,6	0,8	0	0	0,6	0	0	0,4	0,8	0	0	0,2	0	0,8	1	0	0,6
0	0	0	0,2	0	0,4	0	0	0	0,2	0	0,8	0	0,4	0,4	0	0,8	0,8	
0	0,6	0	0	0	0,4	0	1	0,6	0,4	0,2	0	0,4	0,6	0,2	0,8	0,2	0	0
0	0	0	0,6	0	0	0	0	1	0	0	0,2	0,8	0	0	0	0	1	0,6
0,2	0,4	0,2	0	0,2	0	0,2	0,2	0,6	0	0	0	0	0,2	0	0,2	0	0,6	0

ParçaSayısı: 19
MakineSayısı: 8

0,6	0,8	0	0	0	0	0,4	0	0	0,4	0,6	0,2	0,6	0	0	0,8	1	0	1
0	0	0,8	0,6	0,6	0	0,2	0	0	0,6	0	0,4	0,4	0	0	0,4	0,2	1	0
0	0,2	0	0,4	0,8	0	0	0,4	0,8	0,4	0	0,2	0	0,8	0,8	0,8	0,4	0	0
0	0,2	0,6	0,4	0	0,2	0,6	0,8	0	0,8	0	0,2	0	0	0	0	0,2	0	0
0,4	0	0,8	0,4	0	0,8	0,8	0,2	0,8	0	0,8	0	0	0	0,2	0,2	0,6	0,4	0,6
0,2	0	0	0,2	0,4	0	0,8	0	0	0,2	0,4	0,6	0	0	0,8	0,8	0	0,6	0,4
0,4	0	0	0	0,8	1	0,8	0	0	0,6	0	0	0,8	0	0,2	0	1	0,4	0
0,2	0	0	0,6	0,6	0	0	0,6	0,2	0,4	0,2	0,2	1	0,4	0,2	0	0	0	0

ParçaSayısı: 19
MakineSayısı: 10

0,2	0	0,2	0	0,6	0,6	0,6	0	0,8	0,4	0	0,6	0,4	0	0	0	0,6	0,4	0
0,2	0	0,2	0	0	0	0,8	0,6	0,8	0	0,6	0	0,2	0	0	0,2	0,6	0,2	0,2
0	1	0	0,4	0	0	0,6	0,4	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8	0
0,8	0	0,4	0	0,2	0,2	0,4	0	0	0,4	0	0	0	0,2	0	0,6	0,6	0,8	0,4
0	1	0,8	0	0,4	0	0	0,2	0,4	0	0	0	0,2	0,2	0	0,4	0	0,4	0
0	0	0,4	0	0	0	0	0	0,8	0	0,2	0,6	0	0	0	0,2	0	0	0,6
1	0,6	0	1	0,6	0	1	0,2	0,4	0,6	0,2	0	0,4	0	0,8	0,2	0	0,95	0,75
0,4	0,2	0	0	0	0,6	0,8	0,6	0	0	0	0,2	0	1	0,4	0	0	0	0
0,4	0	0,6	0,4	1	0	0	0,6	0	0,2	0,4	0	0,6	0	0,6	0,6	0,4	0,6	0
0,4	0,8	0,8	0,2	1	0,8	0,9	0,8	0,8	0,6	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0,8

ParçaSayısı: 24
MakineSayısı: 7

0	0,6	0	0,4	0,8	0,8	0	0	0,8	0,6	0	0,8	0	0,6	0,6	0,8	0	0	0,6	0,4	0,8	0	0	0
0,6	0,8	0,6	0,6	0,4	0	0,6	0,2	0	0,2	0	0	0	0	0,2	0	0,8	0,4	0	0,4	0,8	0,6	0	0
0	0	0	0,6	0,2	0	0,8	0,2	0	0	0	0,8	0	0,4	0,2	0,4	0,2	0	0	0	0,6	0,4	0	0,2
0	0,2	1	0	0	0,4	0	0	0,2	0	0	0,8	0	0,4	0	0	0,6	0	0,2	0	0,4	0,8	0,4	0,6
0	0	0	0	0,4	0,4	0,2	0,4	0,8	0	0	0,6	0	0,2	0,9	0	0,95	0,4	0,2	0,4	0,4	0	0	0
0,2	0	0,6	0	0	0	0,4	0,8	0,6	0,8	0,2	0,2	0	0	0,6	0	0	0	0	0	0,2	0,8	0	0
0,6	0	0	0,8	0,4	0,8	0,2	0	0,6	0,8	0,6	0	0,8	0	0,4	0,25	0,8	0,4	0,4	0	0	0,8	0	0

ParçaSayısı: 24
MakineSayısı: 9

0,2	0,2	0	0	0,8	0,4	0,6	0,2	0	0,4	0,8	0	0,2	0	0	0,2	0,8	0,6	0,2	0	0	0,2	0	0
0	0	0	0,8	0,4	0	0	0,4	0	0	0,8	0,8	0,6	0,4	0	0,4	0,6	0	0,2	0	0,2	0,6	0,4	0
0,6	0	0	0,6	0	0	0	0,8	0	0	0,6	0	0	0	0	0	0,8	0	0	0	0	0	0	0,6
0	0	0,6	0,6	0	0,4	0	0	0,8	0,8	0	0,6	0,4	0	0,8	0,6	0	0	0,4	0,4	0	0	0	0,4
0	0	0	0,4	0	0,4	0,6	0,8	0,6	0	0,6	0	0,2	0	0	0,2	0,4	0,4	0	0	0	0,6	0	0
0	0,4	0,6	0,6	0	0	0,6	0,6	0	0,6	0,8	0,2	0,4	0,2	0	0,8	0	0	0,6	0,4	0,2	0	0	0,4
0	0,6	0,6	0	0,8	0	0,2	0	0,2	0	0	0,2	0	0	0	0,8	0,2	0,6	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,8	0,4	0,2	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0	1	0,2	0	0	0,75	0	0	0,8	0	0
0,2	0,8	0,8	0,2	0	0	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	0,2	0	0	1	0,6	0	0	0,2	0	0,4	0,6	0,2	0,8

ParçaSayısı: 24
MakineSayısı: 11

0	0	0	0	0,2	0,4	0,6	0	0	1	0	0	0,4	0	0	0	1	0,2	0	0,2	0	0	0,6	0	0,8
0,6	0	0,4	0	0,8	0	0	0,2	0,2	0,4	0,8	0,8	0,6	0	0,4	0,4	0,2	0,6	0,6	0,6	0	0,2	0,4	0,6	0
0	0,2	0,4	0,4	0,6	0,2	0,6	0,4	0	0	0,4	0	0,6	0,6	0	0	0,4	0,6	0	0,8	0,8	0	0	0,6	0
0	0	0	0	0,6	0,8	0,2	0,4	0	0,2	0,2	0	0,8	0,2	0	0,4	0	0	0,2	0,4	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,25	0,4	0	0,4	0	0	0	0	0,4	0	0	0,2	0	0	0,2	0	0,6
0	0	0,2	0,8	0,6	0,4	0	0	0	0	0,2	0,6	1	0	0,2	0	1	0,4	0	1	0	0	0,6	0,8	0
0	0	0,2	0,4	0	0	0	0,2	0	0,8	0	0	0,4	0,8	0,8	0,2	0	0	0,8	0,2	0,6	0,4	0,4	0,8	
0	0,4	0	0	0,2	0,6	0,9	0,8	0	0,6	0	0,8	0	0	0	0,6	0,6	0,8	0	0	0,2	0,8	0	0	
0	0	0	0	0,2	0	0	0	0,2	0,8	0	0,4	0	0	0,2	0	0,8	0	0	0,6	0,2	0	0,6	0	
0,2	0	0	0,4	0	0,8	1	0	0,2	0	0	0,8	0	0	0	0,6	0	0	0	0,4	0	0,8	0,4	0	
0	0,8	0,6	0,2	0,8	0,8	1	0	0	0	0	1	0	0,2	0,4	0	0	0,4	0,4	0	0	0,4	0,2	0	

Bölüm 15

PEM YAKIT HÜCRESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN KASKAT DA-DA YÜKSELTEN TİP DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN PID PARAMETRELERİNİN METASEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE OPTİMİZASYONU

Funda DEMİR¹

Batıkan Erdem DEMİR²

Sude KART³

1 Dr. Öğr.Ü. Funda DEMİR Karabük Univ. TOBB Teknik Bilimler MYO,
Karabük, TÜRKİYE. ORCID ID: 0000-0001-7707-8496

2 Dr. Öğr.Ü. Batıkan Erdem DEMİR Karabük Univ. Teknoloji Fakültesi Karabük,
TÜRKİYE. ORCID ID: 0000-0001-6400-1510

3 Dr. Öğr.Ü. Sude KART Karabük Univ. TOBB Teknik Bilimler MYO Karabük,
TÜRKİYE. ORCID ID: 0000-0001-6631-7316



1. Giriş

Yakıt Hücreleri, petrol tabanlı yakıtların neden olduğu çevre sorunlarına karşı kullanılan alternatif, temiz enerji kaynaklarından biridir. Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren yakıt hücreleri, ekonomik, sessiz ve çevre ile uyumlu güç dönüştürücüleridir. Yüksek dönüşüm verimliliği, kompakt yapıda olmaları ve emisyon problemlerinin olmaması gibi avantajlarından dolayı yakıt hücreleri, içten yanmalı motorların ve portatif uygulamalarda ise akülerin ve pillerin yerini alabilecek bir teknolojiye sahiptir (Kahraman ve Özgün, 2021). Yakıt pillerinde kullanılan metanol, etanol, hidrojen, doğalgaz, LPG gibi yakıtların arasında enerji verimi en yüksek olan hidrojenidir. Bu yakıt temelde, Hidrojen (H_2) ve Oksijen (O_2) arasındaki elektrokimyasal reaksiyon sonucunda elde edilir. Bir buhar kazanı veya türbini kullanılmaz, sadece kimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi üretilir. Toplam verimlilikleri % 80'lere kadar ulaşabilen yakıt hücreleri, sürekli çalışan piller veya elektrokimyasal makineler olarak da bilinir. Yapısındaki en önemli bileşen, anot ve katot arasındaki reaksiyonların oluşumunu sağlayan geçirgen yapıdaki membrandır (Gelen, 2012).

Kullanılan elektrolitin yapısına göre sınıflandırılan yakıt hücreleri; proton değişim membran yakıt hücreleri (PEMYH), alkali yakıt hücreleri (AYH), katı oksit yakıt hücreleri (KOYH), fosforik asit yakıt hücreleri (FAYH) ve erimiş karbonat yakıt hücreleri (EKYH) olarak adlandırılır (Bakangura, Wu, Ge, Yang, ve Xu, 2016). PEM yakıt hücreleri, 60-80 °C arasındaki düşük çalışma sıcaklığında yüksek verim sağlamaları, sessiz ve hızlı çalışma özellikleri, güç talebindeki değişikliklere hızlı tepki verebilmeleri, düşük ağırlık ve hacme sahip olmaları ve saf suyun haricinde herhangi bir atık ortaya çıkarmamaları gibi avantajlarından dolayı birçok uygulama için tercih edilmektedir. Özellikle ulaşım alanındaki uygulamalar, taşınabilir cihazlar ve küçük sabit uygulamalar için gelecek vadeden enerji kaynakları arasındadır (Karanfil, 2020).

PEM YH'nin performansı akım-gerilim karakteristiğiyle ilişkilidir. Çıkış gerilimi azaldığında, hidrojende birim başına üretilen güç de azalmaktadır. Yani gerilim, YH verimliliği için bir ölçüttür (O'Hayre, Cha, Colella, ve Prinz, 2006). PEM YH'nin düşük olan gerilim çıkışını yükseltmek için DA-DA (Doğru Akım-Doğru Akım) güç dönüştürücülerini kullanılır. Bu dönüştürücülerin temel amacı, yük değişiklikleri karşısında düzensizlik gösteren DA giriş gerilimini, kontrol edilebilen ve yükseltilmiş bir DA çıkış gerilimine dönüştürmek ve aynı zamanda, güçlü ve dinamik bir sistem performansı sağlamaktır. Dönüştürücülerin anahtarlamalı yapıları ve dolayısıyla doğrusal olmayan bir davranışa sahip olmaları nedeniyle, dönüştürücü için geliştirilen kontrol yöntemleri önemli bir çalışma alanıdır. Bu yöntemlerin birçoğu, sistem değişkenlerinin izolasyonu ve (Oransal, Integral, Türevsel) PID denetleyici tasarımı üzerine odaklanmaktadır (Marsala ve Ragusa, 2012; Uran ve Milanovic, 2003). Tasarımlarındaki basitlikle birlikte, düşük aşım miktarı,

küçük yerleşme süresi gibi iyi bir performansa sahip olmaları sebebiyle PID denetleyiciler, mevcut endüstriyel denetleyiciler arasında yer almakta ve sin-yal çıkışında kalite ve sağlıklarını iyileştirmek için sürekli gelişim göstermektedir (Ghamari, Jouybari, Mollae, Khavari, ve Hajhosseini, 2023). Ancak etkinlikleri parametrelerinin iyi ayarlanmasına bağlıdır. Parametre ayarlama işinde, geleneksel yöntemlerin yanısıra metasezgisel optimizasyon algoritmaları gibi ileri düzey yöntemlerin kullanımını da giderek artmaktadır (Hekimoglu, Ekinci, ve Kaya, 2018) .

Literatürde son yıllarda yapılmış çalışmaları inceleyecek olursak; Şahin vd. tarafından yapılan bir çalışmada, DC motorun hız kontrolünde kullanılan PID denetleyiciye ait K_p , K_i , K_d parametrelerinin en uygun değerleri balina optimizasyon (Whale Optimisation Algorithm-WOA) ve güve-alevi optimizasyon (Moth Flame Optimization-MFO) algoritmaları kullanılarak belirlenmiştir. Parametreleri belirlemek için hata tabanlı bir amaç fonksiyonu olan hatanın mutlak değerinin zaman ağırlıklı integrali (Integral of Time-Weighted Absolute Error-ITAE) kullanılmıştır. İki farklı yönteme ait performans analizleri ve yük bozucu cevapları Matlab Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve her iki algoritma için de iki farklı yaklaşımla tasarlanan PID denetleyicilerin geçici yanıt analizi, frekans analizi, performans indislerinin analizi ve yük bozucu cevabı analizler, yine Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. WOA-PID tabanlı denetleyicinin MFO-PID tabanlı denetleyiciye göre daha iyi sonuç verdiği açıklanmıştır (Şahin, Akyazı, Sahin, ve Çakır, 2021).

Güven tarafından yapılan çalışmada, kesir dereceli PID (KDPID) denetleyici parametreleri Jaya Optimizasyon Algoritması (JOA) ile bulunmaya çalışılmıştır. JOA, KDPID'ye ait beş parametreyi optimize etmektedir. Kurulan sistem Fotovoltaik güneş paneli, sürekli mıknatıslı DA motoru, sürücü, kontrolör, yükler ve ölçüm elemanlarından oluşmaktadır. Benzetim çalışmasında yükler de dinamik olarak değiştirilerek sistem zorlanmakta ve performansı incelenmektedir. Sistemin tamamı Matlab/Simulink ortamında modellenmiş ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. İlk önce geniş bir aralıkta JOA çalıştırılmış ve arama uzayında en iyi değerler elde edildikten sonra sistem bu parametrelere göre çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir (Güven, 2023).

Yurdusever ve Danayiyen tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bir otomatik voltaj regülatör sistemi için Karınca Kolonisi Algoritması (Ant Colony Algorithm-ACO) ile çalıştırılan bir PID denetleyici sunulmuştur. Sistem performansını iyileştirmek için ağırlık katsayılarını, integral zaman ağırlıklı mutlak hatasını (ITAE), maksimum aşma ve yerleşme zamanını kullanan bir amaç fonksiyonu önerilmiştir (Yurdusever ve Danayiyen, 2023).

Yaylacı vd. çalışmalarında, DA-DA dönüştürücüdeki kapalı çevrim çıkış geriliminin kontrolü için PI denetleyici tasarlamıştır. Denetleyiciye, kızıltilki optimizasyon algoritması uygulanarak, sürekli hal hatası iyileştirilmeye ça-

lıştır. İşlem için kullanılan amaç fonksiyonu, hata mutlak değerlerinin toplamı, zamanla ağırlıklandırılmış hata karelerinin toplamı ve hata karelerinin toplamının ortalaması alınarak, hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization-PSO) yöntemi ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir (Yaylaci, Yılmaz ve Özdeş, 2022).

Khleaf vd. yaptıkları çalışmada, büyük sinyal bölgelerinde çalışan bir yükselten tip (boost) DA-DA dönüştürücüyü kontrol etmek için PSO ve Yapay sinir ağlarını (YSA) kullanmıştır. Denetleyicinin performansını değerlendirmek için simülasyonlar gerçekleştirmiş ve bunu geleneksel PID denetleyicilerle karşılaştırmıştır. Simülasyon sonuçları, PID-YSA algoritmasının dönüştürücünün başlatma tepkisini geliştirdiğini ve geleneksel PID denetleyicilere kıyasla daha az anahtarlama işlemi kullandığını göstermiştir. Anahtarlama işlemindeki bu azalma, çıkıştaki geçici bozulmaların ve anahtarlamaya bağlı kayıpların etkin bir şekilde azalması açısından önemlidir. Ayrıca, simülasyonlar, PID-YSA denetleyicisinin giriş gerilimindeki olası bozulmaları etkin bir şekilde reddettiğini ve sistemin genel istikrarını artırdığını da göstermiştir (Khleaf, Nahar, ve Jabbar, 2019).

Tehrani vd, tarafından yapılan çalışmada, yükselten tip DA-DA dönüştürücü kontrolünde kullanılmak üzere kesir dereceli PID denetleyici tasarlanmıştır. Bu denetleyici, klasik tam sayı dereceli PID denetleyicilere göre daha gelişmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde, Strength Pareto Evrimsel Algoritması (SPEA) adı verilen çok amaçlı bir optimizasyon algoritması kullanılmaktadır. Önerilen yöntem istenen dinamik yanıtın yanı sıra mükemmel bir başlatma tepkisi sunmaktadır. Makalede, optimum tam sayı dereceli PID denetleyici ile optimum kesirli dereceli PID denetleyici arasında bir karşılaştırma da sunulmakta ve kesirli denetleyicilerin tam sayı denetleyicilere göre üstünlüğü kanıtlanmaktadır (Tehrani vd., 2010).

Aguilia-Leon vd. tarafından yapılan çalışmada, bir DA-DA yükselten tip dönüştürücüyü kontrol eden PID denetleyicinin parametrelerini ayarlamak için Gri Kurt Optimizasyon (Grey Wolf Optimization-GWO) algoritması önerilmiştir. Bu algoritma, doğadaki kurtların avlanma stratejilerine dayanan metasezgisel bir optimizasyon yöntemidir. Önerilen GWO algoritması, PSO ve Genetik Algoritma (Genetic Algorithm-GA) ile karşılaştırılmış, performansları kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Simülasyonların MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmesinin ardından ayarlanan PID denetleyicinin performansı değişken yük koşullarındaki sistem tepki analizi ve çıkış geriliminin belirlenen referans değer ile arasındaki ortalama kare hatası (Root Mean Square Error-RMSE) kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, önerilen GWO algoritmasının PSO ve GA'ya kıyasla daha düşük bir RMSE'ye sahip olduğunu göstermiştir (Aguilia-Leon, Chinas-Palacios, Vargas-Salgado, Hurtado-Perez, ve Garcia, 2020).

Patel vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bir DA-DA yükselten tip dönüştürücünün tasarımı ve kontrolü tartışılmaktadır. Önerilen birleşik indüktör ve klamplama devresi ile verim kaybı olmadan daha yüksek kazançlar elde edilebileceği açıklanmıştır. Yük tarafında sabit gerilimi korumak için KDPID denetleyici ve KDPID denetleyicisinin ayarlanması için farklı optimizasyon algoritmaları önerilmiştir. Sistem için ‘tümleşik zaman ağırlıklı mutlak hata’ (ITAE), performans kriteri olarak alınmış ve optimizasyon algoritmaları tarafından minimize edilmiştir. KDPID denetleyicisinin parametre değerlerini elde etmek için GA, PSO, WOA ve GWO olmak üzere dört farklı algoritma denenmiştir. Dönüştürücünün tasarımı ve simülasyonu için MATLAB Simulink kullanılmış ve farklı optimizasyon algoritmalarıyla elde edilen KDPID denetleyici sonuçları, karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Patel, Srishti, ve Padhy, 2023)

Agulia-Leon vd. bir diğer çalışmalarında, yükselten tip DA-DA Dönüştürücü için GWO, PSO ve GA algoritmalarını kullanarak PID denetleyicilerin performansını karşılaştırmıştır. Dönüştürücü, durum-uzay denklemleriyle modellenmiş ve ardından ilgili PID denetleyicinin optimizasyonu MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Algoritmanın performansı RMSE kullanılarak değerlendirilmiş ve sonuçta, GWO algoritmasının güç dönüştürücülerinde PID denetleyicisinin ayarlanması sorununa yönelik bir çözüm olduğunu gösterilmiştir (Aguila-Leon, Chiñas-Palacios, Vargas-Salgado, Hurtado-Perez, ve Garcia, 2021).

Bu çalışmada PEM yakıt hücresine ait yük değişiklikleri karşısında düzensizlik gösteren DA giriş gerilimini, kontrol edilebilen ve yükseltilmiş bir DA çıkış gerilimine dönüştürmek amacıyla çift katlı yükselten tip DA-DA dönüştürücü tasarlanmıştır. Bu dönüştürücünün kontrolü PID denetleyici ile gerçekleştirilmiştir. PID’ye ait parametreleri belirlemek amacıyla metasezgisel optimizasyon yöntemlerden olan GA, PSO, Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony-ABC) ve Ateş Böceği (Fire Fly Algoritma-FA) algoritmaları denenmiştir. Matlab Simulink ortamında elde edilen grafikler karşılaştırmalı olarak açıklanmış ve sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. Kaskat Yükselten Tip DA-DA Dönüştürücü

DA-DA dönüştürücüler, mevcut gerilim değerini istenilen düzeye yükseltmek veya düşürmek için kullanılan elektronik devrelerdir. Dönüştürücüler, doğrusal olmayan sistemler oldukları için verimlilikleri, devrenin tasarımına ve kontrolüne bağlı olarak değişmektedir. DA-DA dönüştürücü devreleri temelde, güç katı ve denetleme katından oluşmaktadırlar. Güç katı, yarı iletken devre elemanları ve filtreleme elemanlarından oluşmaktadır. Giriş gerilimine bağlı olarak istenilen büyüklükte çıkış gerilimi elde etmek için kullanılır. Denetleme katı ise yarı iletken devre elemanlarını ilettime geçiren anahtarlama sinyali üretir ve bu sinyalin zamanlamasını denetler. Gerilim

dönüştürücü yada güç dönüştürücü olarak da adlandırılan DA-DA dönüştürücüler, genel kullanım amacına göre yükselten (boost), düşüren (buck), düşüren-yükselten dönüştürücüler (buck-boost) olarak adlandırılır. PV sistemler yada yakıt hücreleri gibi düşük çıkış gerilimine rağmen yüksek performans beklenen uygulamalarda DA-DA yükselten tip dönüştürücü tercih edilir. Bu dönüştürücülerde yüksek çıkış gerilimi elde edebilmek için, görev çarpanını yüksek tutmak gerekir. Ancak diğer taraftan, yüksek görev çarpanı seçmek de dönüştürücünün çalışmasını olumsuz olarak etkileyebilir. Görev çarpanını fazla yükseltmeden gerilim oranını yüksek tutabilmek için önerilen çözümlerden biri kaskat DA-DA dönüştürücü kullanmaktır (Van Rensburg, Case, ve Nicolae, 2008). Çift anahtar yapısıyla kontrol edilen bu dönüştürücüde iki tane DA-DA yükselten tip dönüştürücü kaskat olarak bağlanmıştır. Bu durumda 1. katmanın çıkışında elde edilen çıkış gerilimi Eşitlik 1’de verilmektedir.

$$V_{C1} = \frac{V_G}{1-d} \quad \text{Eşitlik 1}$$

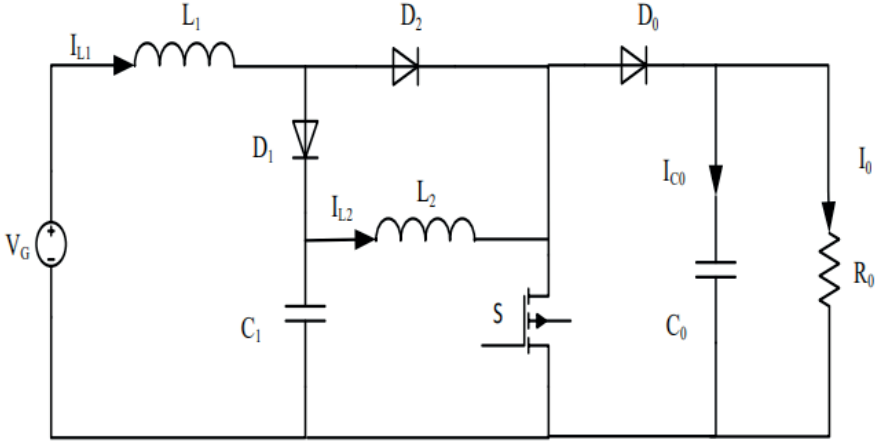
Devrenin 2. katmanından elde edilen çıkış gerilimi de Eşitlik 2’de verilmektedir.

$$V_0 = \frac{V_{C1}}{1-d} \quad \text{Eşitlik 2}$$

Katmanlar arasındaki gerilim değerlerinin hesabından sonra elde edilen giriş-çıkış gerilimi dönüşüm oranı ise Eşitlik 3’de verilmektedir. Eşitliklerde yer alan d , S anahtarının görev çarpanıdır.

$$V_0 = \frac{V_G}{(1-d)^2} \quad \text{Eşitlik 3}$$

Gerçekleştirilen çalışmada, daha az devre elemanı kullanarak maliyeti azaltan bir tasarım oluşturmak ve çift anahtarlamadaki güç kaybını azaltmak amacıyla tek anahtarlı DA-DA kaskat yükselten tip dönüştürücü kullanılmıştır. Çıkış ve giriş gerilim hesaplamaları çift anahtarlamalı devre için verilen Eşitlik 1, Eşitlik 2 ve Eşitlik 3 ile aynıdır. Tek anahtarlı DA-DA kaskat yükselten tip dönüştürücü devresi Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Tek anahtarlı kaskat yükselten tip dönüştürücü devresi

Şekil 1’de verilen devrede S anahtarı iletimde iken D_2 diyodu doğru yönde, D_1 ve D_0 diyotları ise ters yönde kutuplanmıştır. S anahtarının iletimde olduğu süre boyunca, giriş (V_G) geriliminden dolayı L_1 bobininde meydana gelen akım I_{L1} ’dir. V_{C1} geriliminden dolayı L_2 bobininde meydana gelen akım ise I_{L2} ’dir. I_{L1} ve I_{L2} akımları sırasıyla V_G , L_1 , D_2 , S , V_G ve V_{C1} , L_2 , S , V_{C1} yollarını takip ederek artış göstermektedir. S anahtarı kesimdeyken ise D_2 diyodu ters yönde kutuplanırken D_1 ve D_0 diyotları bir önceki durumun aksine, doğru yönde kutuplanır. S anahtarının kesimde olduğu süre boyunca, bobinlerde depolanan enerji RC devresine doğru akar ve böylece gerilimler arasında $V_G < V_{C1} < V_0$ ilişkisi oluşur. Bobin üzerinde depolanan akımlar bu süre boyunca giderek azalır (Kart, 2021; Koç, 2015).

DA-DA dönüştürücülerde, istenilen çıkış gerilimini elde etmek ve aynı zamanda, meydana gelebilecek bozulmalar ve değişikliklere karşı uygun bir yanıt sağlamak amacıyla sistemin iyi bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Dönüştürücünün çıkışındaki gerilim değeri, istenilen referans değeri ile karşılaştırılır ve aradaki fark hata değeri olarak adlandırılır. Denetleyicinin görevi bu hata değerini en kısa zamanda en aza indirmektir. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan denetleyici çeşitlerinden biri PID denetleyicilerdir. PID denetleyiciler, geri besleme döngüsü aracılığıyla çıkış hatasını ölçer ve Oransal, Türevsel ve Integral olarak adlandırılan 3 ana kontrol terimini birleştirerek kontrol sinyalini oluşturur. PID denetleyicinin istenilen performansı gösterebilmesi, parametrelerinin iyi ayarlanmasına bağlıdır. Parametrelerin ayarlanması için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlar, sistem tepkisinin matematiksel modellenmesini ve analizini gerektiren klasik yöntemlerden (Ogata, 2010), PID denetleyicinin optimal parametre değerlerini bulmak için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarına dayanan tekniklere (Nisi, Nagaraj, & Agalya, 2019)

kadar çeşitlilik göstermektedir. Klasik PID denetleyici ayarlama yöntemleri arasında Ziegler-Nichols yöntemi, Chien-Hrones-Reswick (CHR) yöntemi, Cohen-Coon yöntemi, integral performans kriteri (IMC), kazanç ve faz payına dayalı tasarım yöntemleri en bilinen yöntemlerdendir. Bu yöntemler, sistemin matematiksel modelini kullanarak denetleyici parametrelerinin uygun değerlerini bulmaya çalışır. Ancak bu yöntemler, sistem modelinin doğru ve tam bir şekilde bilinmesini gerektirir ve bazen istenen performansı elde etmek için denemeler ve ayarlamalar gerektirebilir.

Optimizasyon algoritmaları temelli PID denetleyici ayar yöntemleri ise, denetleyici parametrelerini optimize etmek için meta-sezgisel algoritmaları kullanır. Bu yöntemler, genellikle sistemin matematiksel modeline veya ayrıntılı analize ihtiyaç duyarlar. Ayrıca, denetleyici parametrelerini otomatik olarak ayarlayabilirler. Ancak, optimizasyon süreci bazen hesaplama karmaşıklığına sebep olabilir ve yüksek işlem gücü gerektirebilir. Hangi PID ayarlama yöntemin kullanılacağı, sistem özelliklerine, performans gereksinimlerine ve kullanılabilir verilere bağlı olarak belirlenmelidir (Aguila-Leon, Chinas-Palacios, Vargas-Salgado, Hurtado-Perez, ve Garcia, 2020)

3. Optimizasyon Algoritmaları

Bu çalışmada çift anahtarlamalı kaskat DA-DA konvertörün PID parametrelerini belirlemek için 4 farklı optimizasyon algoritması denenmiştir. Bu algoritmalar GA, PSO, ABC ve FA 'dır.

3.1.Genetik Algoritma

GA, doğal yaşam döngüsünü ve biyolojik evrim prensiplerini taklit ederek optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan meta-sezgisel bir algoritmadır. Biyolojik üreme sürecindeki gen kombinasyonlarını model alan kurullarla, bireysel noktaların bir popülasyonunu tekrar tekrar değiştirerek ilerler (Bajpai ve Kumar, 2010) . İlk tahminlerin, kromozomlar olarak tanımlanan bir başlangıç popülasyonuna göre belirlendiği genetik algoritmada, optimal bir çözüme doğru birkaç doğal kural takip edilerek ardışık nesiller için çözüm üretilir (Pereira, Batista, de Brito, ve Godoy, 2022). Seçim, çaprazlama ve mutasyon olmak üzere üç temel genetik operatöre sahip tipik bir genetik algoritmada başarı, çözümün temsil ettiği uygunlukla doğrudan orantılıdır. Süreç, bir GA'nın optimize edilmesi gereken sorunlar için en uygun olduğunda sona erer (Lambora, Gupta, ve Chopra, 2019). Rastgele doğası nedeniyle, global-optimum çözümleri aramada çok etkili ve stabil bir algoritmadır. Genetik algoritma, kısıtsız, sınırlı-kısıtlı ve genel optimizasyon problemlerini çözmeye yardımcı olur ve fonksiyonların türevlenebilir veya sürekli olması gerekliliği yoktur (Bajpai ve Kumar, 2010) . Genetik Algoritmaya ait pseudo kodu şu şekildedir: (Marin, Bignon, ve Lequay, 2008)

```

generation=0;
initialize population;
while generation <max-generation
    evaluate fitness of population members
    for i from 1 to elites
        select best individual
    endfor
    for i from elites to population-size
        for j from 1 to tournamentsize;
            select best parents
        endfor
        for k from elites to population-size*(1-mutationrate)
            crossover parents->child;
        endfor
        for k from population-size*(1-mutationrate) to population-size
            mutaparent->child;
        endfor;
        insert child into next generation's population;
    endfor;
    update current population
    generation++;
endwhile;

```

3.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması

PSO algoritması, Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından önerilen, sürülerin, böceklerin, kuşların ve balıkların da dahil olduğu hayvanların sosyal davranışını taklit eden bir metasezgisel optimizasyon tekniğidir. Doğada yer alan bu hayvan sürüleri doğal hayatta, yiyecek bulmak için iş birliği yaparlar ve dolayısıyla ortak bir yol izlerler (Wang, Tan, ve Liu, 2018). Bu doğa temelli sürü-zekasına sahip algoritma, iterasyonlar üzerinde çalışır. Döngü, bir aday çözüm popülasyonu (sürü) ile başlar. Burada, her parçacık, verilen probleme potansiyel bir çözümü temsil eder. Her iterasyonda, popülasyon her bir bireyin hızını ve konumunu güncelleyerek tekrar güncellenir. Bu güncellemeler, kişisel en iyi değer (pbest) ve global en iyi değer (gbest) temel alınarak yapılır (Jain, Saihjal, Singh, ve Singh, 2022). Sürüdeki her bir üye, kendi öğrenme deneyimlerine ve diğer üyelere göre arama desenini sürekli olarak değiştirir. PSO algoritmasının temel tasarım fikrinde iki temel yaklaşım vardır. Bunlardan ilki, evrimsel algoritmadır. PSO da evrimsel algoritma gibi bir sürü modu kullanır ve optimize edilen amaç fonksiyonunun çözüm alanında aynı anda geniş bir bölgeyi arar. Diğer ise yapay yaşamdır, yani yaşam özelliklerine ve bilgisayarla işbirlikçi davranışa sahip yapay sistemleri inceler (Wang, Tan, ve Liu, 2018). Genetik algoritmadan farklı olarak PSO, doğal evrimden esinlenen operatörleri kullanmaz ve aday çözüm kümesinin yeni bir neslini oluşturmak

için bunları birleştirmez (Om Bansal, Bansal, Sharma, ve Shreeraman, 2012). GA'daki mutasyon işlemi PSO'da, popülasyonun bireyleri olan parçacıklar arasında bilgi alışverişi ile değiştirilir. PSO'da parçacık, kendi önceki en iyi konumuna ve komşuluğundaki herhangi bir üyenin elde ettiği küresel önceki en iyi konuma doğru güzergahını ayarlar. PSO'nun küresel varyantı da, sürü komşuluk olarak kabul edilir, yani tüm parçacıklar, bireysel parçacık için bir komşuluk olarak kabul edilir. Bu nedenle, bilgi paylaşımı gerçekleşir ve parçacıklar, peyzajın umut verici bölgelerini ararken diğer tüm parçacıkların deneyiminden ve kullanma sürecinden faydalanır (Kennedy ve Eberhart, 1995). Her iterasyonda PSO algoritması, her parçacığın etkinliğini değerlendirmek ve mevcut parçacığın hızını hesaplamak için amaç fonksiyonuna dayanır. Bu nedenle, performans kriterini temsil eden amaç fonksiyonunun seçimi, optimizasyon algoritmasının arama sürecinde önemli bir rol oynar (Sahib ve Ahmed, 2016). PSO algoritmasına ait Pseudo kod şu şekildedir:

```

Initialize particles population
do
  for each particle p with position  $x_p$  do
    calculate fitness value  $f(x_p)$ 
    if  $f(x_p)$  is better than  $pbest_p$  then
       $pbest_p <- x_p$ 
    endif
  endfor
define  $gbest_p$  as the best position found so far by any of p's neighbors
for each particle p do
   $v_p <- \text{compute\_velocity}(x_p, pbest_p, gbest_p)$ 
   $x_p <- \text{update\_position}(x_p, v_p)$ 
endfor
while (Max iteration is not reached or a stop criterion is not satisfied)

```

3.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Karaboğa tarafından, çok boyutlu optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilen ABC, meta-sezgisel bir algoritmadır. Doğadan esinlenerek geliştirilen algoritma, bal arısı sürülerinin davranışlarını temel alır. Bal arısı sürülerinin yiyecek kaynaklarını ararken sergiledikleri tutumlar, akıllı avcılık davranışları ve kaynakların miktarlarını diğer arılarla paylaşma yöntemleri algoritmaya yön verir (Ali ve Abd-Elazim, 2014). ABC algoritmasında üç tür arı bulunur. Bunlar: çalışan arılar, seyirci arılar ve keşif arılarıdır. Her arı grubunun süreç içerisinde bir görevi vardır. Çalışan arılar, polen ve nektar için yiyecek kaynağı etrafında arama yaparlar. Yiyecek kaynaklarını tüketir ve ayrıca kaynaklarla ilgili verileri (mesafe, yön, karlılık) kovana taşırlar. Bu verileri, kovadaki belirlenmiş dans alanında dans ederek seyirci arılara paylaşırlar. Dansın doğası gereği, tüketilen yiyecek kaynağının miktarı da dans içeriği ile orantılıdır. Dolayısıyla, iyi yiyecek kaynakları daha fazla seyirci arıyı çeker. Seyirci

arıların görevi, tüm çalışan arılardan alınan yiyecek bilgisini değerlendirmek ve nektar miktarıyla ilişkili olasılığa bağlı olarak yiyecek kaynağını seçmektir. Bir yiyecek kaynağı tamamen tüketildiğinde, onunla ilişkili olan tüm çalışan arılar, çalışmayı bırakıp keşifçi arı görevini üstlenirler. Keşifçi arıların görevi yeniden yiyecek kaynağı bulmaktır. Deneyim olmaksızın rastgele bir şekilde yeni yiyecek kaynakları aramaya başlarlar. Eğer keşifçi arı yeni bir kaynak bulursa ve bu yeni kaynak, önceki kaynaktan daha fazla yiyecek içeriyorsa, arı sadece yeni bulunan ve daha iyi olan yiyecek kaynağının konumunu hatırlar ve diğerini belleğinden siler. Son olarak, daha iyi çözüm, eşdeğer bir işletim noktasının daha yüksek olasılığına sahip olan tüm veri setinin eğrisini belirler. (Gonzalez-Castano, Restrepo, Kouro, ve Rodriguez, 2021; Karaboga ve Basturk, 2007; Oshaba, Ali, ve Abd Elazim, 2017) ABC tabanlı algoritmanın temel avantajı, GA ve diğer evrimsel algoritmalarda olduğu gibi kontrol parametrelerini ayarlama konusunda daha fazla çaba gerektirmemesidir. Bu nedenle, uygulama açısından avantajlıdır (Abedinia, Wyns, ve Ghasemi, 2011) .ABC algoritmasına ait pseudo kod şu şekildedir (Zhang, Li, Liu, ve Chu, 2016):

```

Initialize operation;
While ((Iter < MaxCylcle))
// bölüm 1: Çalışan Arılar
for(i=1 : (FoodNumber))
    Form a new food source;
    Calculate the fitness of the new foof source;
    Greedy selection;
endfor
Calculate the probability p;
// bölüm 2:Seyirci Arılar
for(i=1: (FoodNumber))
    Parameter P is set randomly;
    Onlooker bees find food sources depending on P;
    Form a new food source;
    Evaluate the fitness of the new food source;
    Greedy selection;
end for
//bölüm 3: Keşifçi Arılar
If (any employed bee turns to scout bees)
    Parameter p is set randomly;
    The scout bees find food sources depending on p;
end if
Record the best solution;
Iter=Iter+1;
end While

```

3.4. Ateş Böceği Algoritması

Yang tarından 2008 yılında önerilen FA , ateşböceklerinin bilgi ileten yanıp sönme davranışlarını temel alan bir sürü zekası algoritmasıdır (Yang, 2010). Bu algoritma temelde üç ana kurala dayanmaktadır (Yang ve He, 2013) . İlk kural tüm ateş böceklerinin çift cinsiyetli olmasıdır. Bu durumda her ateş böceği bir diğerini etkileme potansiyeline sahiptir. İkinci kural, ateş böcekleri arasındaki çekiciliğin, böceklerin parlaklığı ile doğru orantılı olduğunu; uzaklık arttıkça parlaklığın ve dolayısıyla çekiciliğin azaldığının kabul eder. Ayrıca bu kural dahilinde, iki ateş böceği arasında parlaklığı az olan daha parlak olana doğru ilerler. Kendisinden daha parlak farklı bir ateş böceğine rastlamayanlar ise hareketlerine rastgele devam ederler. Üçüncü kural ise ateş böceğinin parlaklığının amaç fonksiyonu etkinliği ile doğrudan ilişkili olmasıdır (Carbas, 2016; Özyüksel Çiftçioğlu, Doğan, Üstüner, ve Doğan, 2023). FA, parlaklık veya ışık yoğunluğunu ana amaç fonksiyonu olarak kullanır ve algoritmanın temel kavramı, iki ateşböceği çifti kabul edilen x_i ve x_j parçacıkları üzerine dayanır. Düşük parlaklığa sahip olan parçacık, parlaklığını artırmak için en parlak parçacığı bulmaya çalışır. İki parçacık arasındaki mesafe ne kadar uzaksa, parlaklık da o kadar azdır. Gruptaki tüm parçacıklar daha yüksek parlaklıktan daha düşük parlaklığa göre sıralanır. Parçacıkların en iyi eşlerini veya partnerlerini bulma süreci, nesil sayısı belirli bir değerle sınırlandırılana kadar devam eder. Nesil boyunca süregelen üç temel denklem, cazibe (β), kartezyen mesafe (r_{ij}) ve parçacık hareketidir (Ab Talib vd., 2023). FA, literatürdeki pek çok çalışmada, ontoloji eşleme problemini çözmek için kullanılmıştır. Bu çalışmalarda FA'dan varlık eşleme modelini optimize etmek; aynı zamanda, zaman ve bellek tüketimini azaltma konusunda yararlanılmıştır. Son zamanlarda birçok araştırmacı tarafından FA üzerine yapılan çalışmalar, FA'nın doğrusal olmayan dinamik problemlerin çözümünde iyi ve verimli bir algoritma olduğunu kanıtlamaktadır (Zhou, Lv, ve Geng, 2023). FA algortimasına ait pseudo kod şu şekildedir:

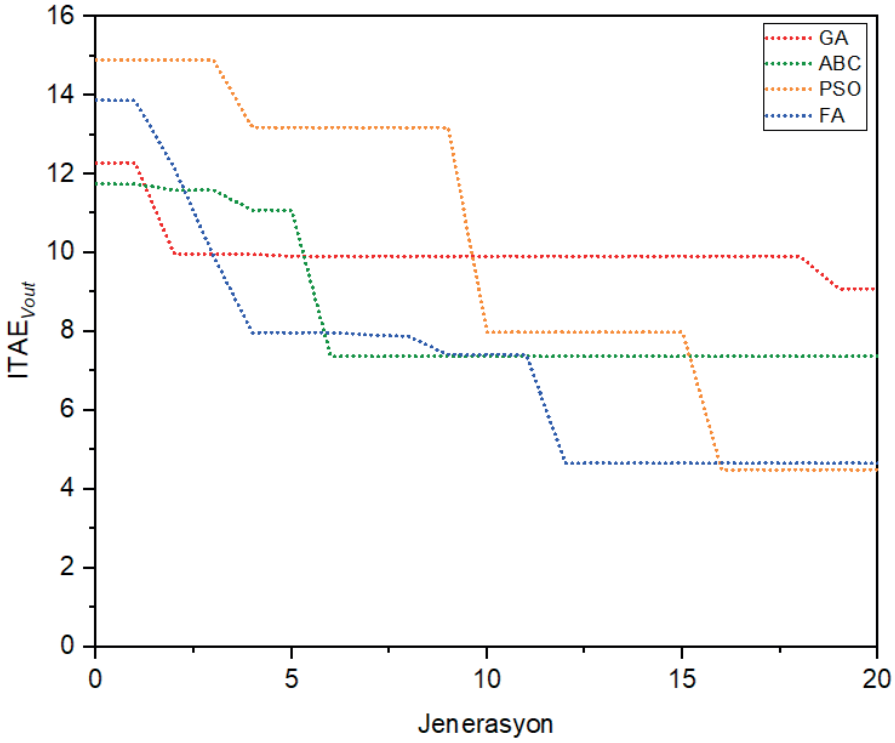

```

Initialize a population of fireflies  $X\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ,  $X_i(x_1, x_2, \dots, x_d)$ 
while  $t < t_{\max}$  do
  for  $i=1:n$  do
    for  $j=1:n$  do
      light intensity  $L$  is determined by objective function
      if  $L_j > L_i$  then
        move firefly  $X_i$  towards  $X_j$  in all  $d$  dimensions
      end if
      Evaluate new solutions and update light intensity  $L$ 
    end for  $j$ 
  end for  $i$ 
  find the best firefly and update generation  $t$ 
end while
Output the best firefly

```

4. Simülasyon Sonuçları ve Bulgular

Akademik çalışmalarda farklı yaklaşımların karşılaştırmalı olarak kullanımı, çalışmanın değerine etki eden bir faktördür. Bu çalışmada, GA, ABC, PSO ve FA meta-sezgisel algoritmaları hatayı minimize etme amacıyla PID denetleyici parametrelerinin ayarlanmasında karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. PEM yakıt pili çıkışını yükseltmek ve sabitlemek için kullanılan kaskat yükselten tip DA-DA dönüştürücü MATLAB/Simulink'te modellendikten sonra, referans çıkış gerilimi değeri için farklı optimizasyon yöntemleriyle simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Kullanılan optimizasyon algoritmalarındaki birey sayısı simülasyon sonuçlarını etkileyeceğinden, popülasyon boyutları eşit olacak şekilde ayarlanmıştır. Optimizasyon algoritmalarının ortak parametreleri olan, popülasyon boyutu 50 ve maksimum iterasyon sayısı da 50 olarak seçilmiştir. Sonuçların doğruluğu açısından, her optimizasyon algoritması 20 kez çalıştırılmıştır. Simülasyonda kullanılacak çıkış gerilimi referans değeri (Vout) ise 200V olarak ayarlanmıştır. PID denetleyici parametrelerinin değer aralığı da $[0 - 1]$ arasındadır. Belirlenen referans değerleri için optimizasyon algoritmalarının uygunluk değerindeki değişimin grafiği Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Uygunluk Fonksiyonu Sonuçları

Ayrıca, her bir algoritmanın ITAE sonuçları Tablo 4.1’de, optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen kontrolcü parametreleri ise Tablo 4.2’de verilmektedir.

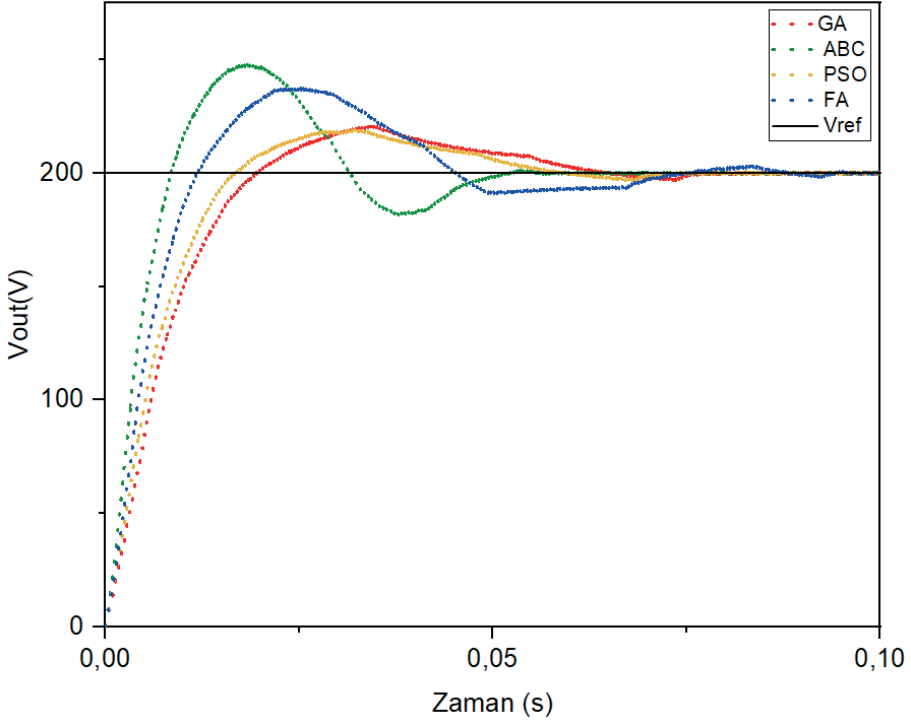
Tablo 4.1. Uygunluk (ITAE)

Değer	Referans	GA	ABC	PSO	FA
V_{out}	200V	7,375	9,084	4,497	4,663

Tablo 4.2. Optimization Algoritmalarından Elde Edilen PID Parametre Değerleri

Algoritma	K_p	K_i	K_d
GA	0,715	0,171	0,049
ABC	1	0,097	0,099
PSO	0.928	0.236	0.051
FA	0,927	0,306	0,159

Çıkış gerilimi (V_{out}) kontrolcü parametresi ITAE uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirildiğinde en iyi sonuç PSO tarafından elde edilmiştir. PSO ile ikinci durumdaki FA'nın sonuçları yakındır ve aralarında fark %3.5'dir. Üçüncü GA ile PSO arasındaki fark %39 ve en başarısız ABC ile PSO değeri arasında fark %50.5'dir. Farklı optimizasyon algoritmalarının en iyi sonuçlara göre belirlenen PID parametreleri kullanılarak elde edilen çıkış gerilimi (V_{out}) grafiği Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Kaskat dönüştürücüye ait çıkış gerilimi (V_{out}) grafikleri. GA, ABC, PSO, FA algoritmaları.

Aynı zamanda, çıkış gerilimi- zaman grafiğine göre optimizasyon algoritmalarının aşım, yerleşme süresi ve yükselme süresi değerlerine dayalı performans karşılaştırmaları Tablo 4.3'de verilmiştir. V_{out} yanıtında en az aşım PSO'da gerçekleşmiştir. En büyük aşım ise ABC'de görülmektedir. Aşım açısından en yüksek ve en düşük değer arasındaki fark %59'dur. PSO ve GA'nın aşım değerleri birbirine yakındır ve aradaki fark %7.5'dir. Üçüncü FA ile fark %48'dir. Yerleşme süresi açısından en iyi sonuç ABC'den elde edilir. En uzun yerleşme süresi FA'da görülür. En kısa ve en uzun yerleşme süresi arasındaki fark %31'dir. İkinci PSO ile ABC arasındaki fark %11.3'dür. Üçüncü GA ile fark %20.3'dür. Yükselme süresi açısından en iyi sonuç ABC'den elde edil-

miştir. En uzun yükselme süresi GA'da görülmektedir. En kısa ve en uzun yükselme süresi arasındaki fark %54'dür. En iyi yükselme süresi sonucuyla FA ve PSO arasındaki fark sırasıyla %25 ve %45'dir.

Tablo 4.3. *Kaskat Dönüştürücü Çıkış Gerilimine (Vout) Ait Kontrol Parametreleri*

Algoritma	Aşım miktarı (%)	Yerleşme zamanı (s)	Yükselme zamanı (s)
GA	0.107	0.059	0.013
ABC	0.241	0.047	0.006
PSO	0.099	0.053	0.011
FA	0.191	0.068	0.008

5. Tartışma

Bu çalışmada, PID denetleyiciye sahip PEM yakıt hücresi için kaskat yükselten tip DA-DA dönüştürücüsü geliştirilmiş ve simüle edilmiştir. Geliştirilen modelin çıkış gerilimine ait kontrolcü parametreleri doğadan ilham alan algoritmalar kullanılarak belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu algoritmalar GA, ABC, PSO ve FA'dır. Optimizasyon algoritmalarının denetleyici performansları, uygunluk fonksiyonu olarak seçilen ITAE'ye göre karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından her bir algoritma 20 kez çalıştırılmıştır. Çıkış gerilimi (Vout) kontrolünde en başarılı sonuç PSO ile elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen grafiklerdeki aşım, yerleşme süresi ve yükselme süresi değerlerine göre optimize edilmiş kontrolcü performansları da incelenmiştir. Aşım açısından en iyi sonuç PSO'dan elde edilmektedir. Yerleşme ve yükselme süresi açısından ise en iyi performanslar ABC ile elde edilmiştir. Optimizasyon yöntemleriyle bu denetleyici parametrelerini elde etmekteki ana hedefimiz, sistem sınırlamalarına tabi olmadan optimal bir denetleyici ortaya çıkarmaktır.

KAYNAKÇA

- Ab Talib, M. H., Mat Darus, I. Z., Mohd Samin, P., Mohd Yatim, H., Hadi, M. S., Sharuddin, N. M. R., ... Mohd Yamin, A. H. (2023). Experimental evaluation of ride comfort performance for suspension system using PID and fuzzy logic controllers by advanced firefly algorithm. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(3), 132. doi:10.1007/s40430-023-04057-5
- Abedinia, O., Wyns, B., ve Ghasemi, A. (2011). *Robust fuzzy PSS design using ABC*. In *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering* (pp. 1–4). IEEE. doi:10.1109/EEEIC.2011.5874849
- Aguila-Leon, J., Chinas-Palacios, C. D., Vargas-Salgado, C., Hurtado-Perez, E., ve Garcia, E. X. M. (2020). *Optimal PID parameters tuning for a DC-DC boost converter: A performance comparative using grey wolf optimizer, particle swarm optimization and genetic algorithms*. In *2020 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2020*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/SusTech47890.2020.9150507
- Aguila-Leon, J., Chiñas-Palacios, C., Vargas-Salgado, C., Hurtado-Perez, E., ve Garcia, E. X. M. (2021). Particle swarm optimization, genetic Algorithm and grey Wolf optimizer algorithms performance comparative for a DC-DC boost converter PID controller. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, 6(1), 619–625. doi:10.25046/aj060167
- Ali, E. S., ve Abd-Elazim, S. M. (2014). Power system stability enhancement via new coordinated design of PSSs and SVC. *Wseas Transactions On Power Systems*, 9, 428–438.
- Bajpai, P., ve Kumar, M. (2010). Genetic algorithm-an approach to solve global optimization problems. *Indian Journal of Computer Science and Engineering*, 1(3), 199–206.
- Bakangura, E., Wu, L., Ge, L., Yang, Z., ve Xu, T. (2016). Mixed matrix proton exchange membranes for fuel cells: State of the art and perspectives. *Progress in Polymer Science*, 57, 103–152. doi:10.1016/j.progpolymsci.2015.11.004
- Carbas, S. (2016). Design optimization of steel frames using an enhanced firefly algorithm. *Engineering Optimization*, 48(12), 2007–2025. doi:10.1080/0305215X.2016.1145217
- Gelen, A. (2012). *Yakıt pillerinin enerji sistemlerindeki dinamik davranışlarının incelenmesi* (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Ghamari, S. M., Jouybari, T. Y., Mollae, H., Khavari, F., ve Hajihosseini, M. (2023). Design of a novel robust adaptive cascade controller for DC-DC buck-boost converter optimized with neural network and fractional-order PID strategies. *The Journal of Engineering*, 2023(3). doi:10.1049/tje2.12244
- Gonzalez-Castano, C., Restrepo, C., Kouro, S., ve Rodriguez, J. (2021). MPPT algorithm based on artificial bee colony for PV system. *IEEE Access*, 9, 43121–43133.

doi:10.1109/ACCESS.2021.3066281

- Güven, A. F. (2023). *Fotovoltaik güneş panellerinden beslenen sürekli mıknatıslı doğru akım motorunu kontrol eden kesir dereceli pid kontrolör parametrelerinin jaya optimizasyon algoritması ile ayarlanması*. In *4th International Conference On HEALTH, ENGINEERING AND APPLIED Sciences*.
- Hekimoglu, B., Ekinci, S., ve Kaya, S. (2018). *Optimal PID Controller Design of DC-DC Buck Converter using Whale Optimization Algorithm*. In *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/IDAP.2018.8620833
- Jain, M., Saihjal, V., Singh, N., ve Singh, S. B. (2022). An overview of variants and advancements of PSO algorithm. *Applied Sciences*, 12(17), 8392. doi:10.3390/app12178392
- KAHRAMAN, H., ve ÖZGÜN, İ. (2021). PEM yakıt hücresi akış alanlarının Üç boyutlu modellenmesi. *European Journal of Science and Technology*. doi:10.31590/ejosat.1017474
- Karaboga, D., ve Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459–471. doi:10.1007/s10898-007-9149-x
- Karanfil, G. (2020). Proton değişim membran yakıt hücreleri: Termodinamiği, bileşenleri ve uygulama alanları. *Mühendis ve Makina*, 61(698), 57–76. doi:10.46399/muhendismakina.750660
- Kart, S. (2021). *Yakıt hücre sistemleri için çift katlı yükselten da-da dönüştürücünün kontrolü* (Doktora tezi). İstanbul Üniversitesi, İstanbul .
- Kennedy, J., ve Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization*. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* (pp. 1942–1948). IEEE. doi:10.1109/ICNN.1995.488968
- Khleaf, H. K., Nahar, A. K., ve Jabbar, A. S. (2019). Intelligent control of DC-DC converter based on PID-neural network. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 10(4), 2254–2262. doi:10.11591/ijpeds.v10.i4.pp2254-2262
- Koç, Y. (2015). *Yumuşak anahtarlama çift katlı yükselten da-da dönüştürücü tasarımı, analizi ve uygulaması*. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Lambora, A., Gupta, K., ve Chopra, K. (2019). *Genetic algorithm- A literature review*. In *2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)* (pp. 380–384). IEEE. doi:10.1109/COMIT-Con.2019.8862255
- Marin, P., Bignon, J.-C., ve Lequay, H. (2008). *A genetic algorithm for use in creative design processes* (pp. 332–339). doi:10.52842/conf.acadia.2008.332
- Marsala, G., ve Ragusa, A. (2012). *Increase of the performance of a low ripple boost converter for PEM FC applications using GA and PSO algorithms*. In *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 908–913). Seoul, Korea (South): IEEE. doi:10.1109/VPPC.2012.6422699

- Nisi, K., Nagaraj, B., ve Agalya, A. (2019). Tuning of a PID controller using evolutionary multi objective optimization methodologies and application to the pulp and paper industry. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 10(8), 2015–2025. doi:10.1007/s13042-018-0831-8
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th Edition, Vol. 5). NJ: Prentice hall.
- O'Hayre, R., Cha, S. W., Colella, W., ve Prinz, F. B. (2006). *Fuel cell fundamentals*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Om Bansal, H., Bansal, H. O., Sharma, R., ve Shreeraman, P. R. (2012). *PID controller tuning techniques: A review power optimiation in hybrid electric vehicle view project PID controller tuning techniques: A review*. In *Journal of Control Engineering and Technology* (Vol. 2, pp. 168–176). Retrieved from www.vkingpub.com
- Oshaba, A. S., Ali, E. S., ve Abd Elazim, S. M. (2017). PI controller design using ABC algorithm for MPPT of PV system supplying DC motor pump load. *Neural Computing and Applications*, 28(2), 353–364. doi:10.1007/s00521-015-2067-9
- Özyüksel Çiftçioğlu, A., Doğan, T., Üstüner, B., ve Doğan, E. (2023). Dairesel boşluklu çelik çerçevelerin optimum tasarımı üzerine karşılaştırmalı bir çalışma. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 170–183. doi:10.21923/jesd.1119446
- Patel, D., Srishti, ve Padhy, P. K. (2023). *Optimal tuning of fractional order PID controller with metaheuristic algorithms for high efficiency high gain DC-DC boost converter*. In *International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE)* (pp. 1–6). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). doi:10.1109/icpee54198.2023.10059937
- Pereira, L. F. da S. C., Batista, E., de Brito, M. A. G., ve Godoy, R. B. (2022). A robustness analysis of a fuzzy fractional order PID controller based on genetic algorithm for a dc-dc boost converter. *Electronics*, 11(12), 1894. doi:10.3390/electronics11121894
- Sahib, M. A., ve Ahmed, B. S. (2016). A new multiobjective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms. *Journal of Advanced Research*, 7(1), 125–134. doi:10.1016/j.jare.2015.03.004
- Şahin, Ali. K., Akyazı, Ö., Sahin, E., ve Çakır, O. (2021). DC motorun hız kontrolü için meta-sezgisel algoritma tabanlı PID denetleyici tasarımı. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 533–549. doi:10.17798/bitlisfen.861591
- Tehrani, K. A., Amirahmadi, A., Rafiei, S. M. R., Griva, G., Barrandon, L., Hamzaoui, M., ... Sargos, F. M. (2010). *Design of fractional order PID controller for boost converter based on Multi-Objective optimization*. In *Proceedings of EPE-PEMC 2010 - 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*. doi:10.1109/EPEPEMC.2010.5606514
- Uran, S., ve Milanovic, M. (2003). *State controller for buck converter*. In *The IEEE Region 8 EUROCON 2003. Computer as a Tool*. (pp. 381–385). Ljubljana, Slovenia: IEEE. doi:10.1109/EURCON.2003.1248048
- Van Rensburg, J. F. J., Case, M. J., ve Nicolae, D. V. (2008). *Double-boost DC to DC con-*

- verter. In *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics* (pp. 707–711). IEEE. doi:10.1109/IECON.2008.4758040
- Wang, D., Tan, D., ve Liu, L. (2018). Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft Computing*, 22(2), 387–408. doi:10.1007/s00500-016-2474-6
- Yang, X. S. (2010). Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2(2), 78. doi:10.1504/IJBIC.2010.032124
- Yang, X. S., ve He, X. (2013). Firefly algorithm: recent advances and applications. *International Journal of Swarm Intelligence*, 1(1), 36. doi:10.1504/IJSI.2013.055801
- Yaylaci, E. K., Yilmaz, A. E., ve Özdeş, H. N. (2022). Kızıl tilki optimizasyon algoritması ile da-da alçaltıcı tip dönüştürücü kontrolör katsayılarının optimizasyonu optimization of buck converter controller coefficients with red fox optimization algorithm. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 1291–140.
- Yurdusever, T., ve Danayiyen, Y. (2023). *Karıncı kolonisi optimizasyon algoritması ile bir AVR sistemi için optimum PID denetleyici tasarımı*. In *1st International Conference on Frontiers in Academic Research* . Retrieved from <https://www.icfarconf.com/>
- Zhang, F., Li, L., Liu, J., ve Chu, X. (2016). Artificial Bee Colony Optimization for Yard Truck Scheduling and Storage Allocation Problem. In *Intelligent Computing Theories and Application: 12th International Conference, ICIC 2016*, (pp. 908–917). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-42294-7_81
- Zhou, X., Lv, Q., ve Geng, A. (2023). Matching heterogeneous ontologies based on multi-strategy adaptive co-firefly algorithm. *Knowledge and Information Systems*, 65(6), 2619–2644. doi:10.1007/s10115-023-01845-2

Bölüm 16

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ARA SOĞUTUCU (INTERCOOLER) ISIL PERFORMANSINI İYİLEŞTİRMEYE YÖNELİK ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRMESİ

Galip KALTAKKIRAN¹



¹ Dr., Ardahan Üniversitesi, 75002 Ardahan, Türkiye,
ORCID ID: 0000-0003-2502-0078

1. Giriş

Otomobil, kamyon, lokomotif, deniz araçları ve güç üretimi gibi çeşitli alanlarda değişik amaçlar için kullanılmak üzere farklı motor dizaynları mevcuttur. Tasarlanan bu motor tipleri içerisinde turbo beslemeli motorlar oldukça geniş bir rol oynamaktadır. Öyle ki, bu tip motorlarda yanma için temel gereksinim olan oksijen emme zamanında silindirlere alınan taze hava ile sağlanmaktadır. Böylece sıkıştırma çevrimi ile birlikte motorun yanma zamanı gerçekleşmiş olur. Doğal emişli motorlarda atmosferik hava işleme tabi tutulur, turboşarjlı motorlarda ise giriş havası egzoz tahrikli türbin kompresör kombinasyonu ile sıkıştırılır. Silindir içerisine normal emişli bir motordan daha fazla hava gönderme işlemi aşırı doldurma olarak adlandırılır. Yapılan bu doldurma ile motorun devir sayısı ve hacmi değişmeden motorun gücü belli bir oranda artırılabilir. Aşırı doldurma ile yüksek beygir gücü elde edilir, motor maliyeti azalır, yakıt tüketimi iyileşir ve yüksek bölgelerde olası güç kayıpları minimize edilir. Yanma prosesinin başlaması öncesinde yakıt ya silindir öncesinde ya da doğrudan silindirlerin içerisine püskürtülür. Yanma işleminin ardından egzoz zamanında artık gazlar bir miktar enerjiye sahiptirler ve bunlar egzoz supabından tahliye edildiklerinde bir turboşarj sisteminden geçirilerek faydalı bir iş elde edilir (Heywood, 2018; Yardım, 2008).

Turboşarj sisteminde silindirleri terk eden egzoz gazı doğrudan turboşarjın türbin kısmından geçer ve bu sırada kanatçıklar ve bağlı olduğu mil dönmeye başlar. Böylece türbinin hareketiyle beraber ortak bir mil üzerinde yer alan karşı taraftaki kompresörde dönmeye başlayarak çevre havasını emer ve sıkıştırılmış bir halde emme manifolduna gönderir. Turboşarjlı motorlarda egzoz gazındaki enerjiden motorun doldurulmasında faydalanılmaktadır. Buradaki hacimsel yükselme net motor gücünde ve motor döndürme momentinde artış sağlamaktadır. Ayrıca turboşarj sistemi sayesinde aynı devir sayısına sahip eş motorlar arasında motor birim güç başına ağırlığı azaltılarak daha fazla güç elde edilebilir (Yardım, 2008).

Turboşarj sisteminde hacimsel veriminin kötüleşmesi önemli bir dezavantajdır. Motor ısınma periyodu sırasında, kararlı çalışma şartlarında veya yüksek devirli seyrinde turboşarjın performansı giderek artmaktadır. Bu süreçte çevreden emilen havanın, turboşarjdan geçerken basınçlandırılmasının yanı sıra sıcaklığında da önemli artışlar gerçekleşir ve hacimsel verim üzerinde negatif bir etki oluşur. Bu etki, emme havası sıcaklığının yeterince yüksek değerlere çıkmasıyla birlikte motorun hacimsel veriminin kötüleşmesine sebep olur. Bu durum doğrudan hem motor performansında hem de motor emisyon karakteristikleri üzerinde istenmeyen etkilere sebebiyet vermektedir.

2. İçten Yanmalı Motorlarda Hacimsel Verim

İçten yanmalı motorlar için oldukça önem arz eden bazı performans parametrelerinden birisi hacimsel verimdir (η_v). Bu parametre motorlarda indüksiyon sürecinin etkinliğini belirlemede faydalanılan önemli bir parametredir. Bunun yanı sıra hacimsel verim farklı bir indüksiyon sürecine göre çalışan dört zamanlı motorlarda kullanılmaktadır. Gaz kelebeği, giriş portu ve valf dahil olmak üzere giriş sistemindeki akış kısıtlamaları, emme havası basıncını düşürerek silindirdeki havanın yoğunluğunun ve dolayısıyla kütle-sinin azalmasına neden olur. Bununla birlikte, hacimsel verim hacimsel bir oran değil, kütle-sel bir oran ifade etmektedir (Ferguson ve Kirkpatrick, 2015). Hacimsel verim, emme sistemi içerisine gönderilen taze havanın kütle-sel debisinin pistonun yer değiştirme hacmine oranı şeklinde Eşitlik 1 ile tanımlanır (Heywood, 2018).

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_i}{\rho_i V_d N} \quad (1)$$

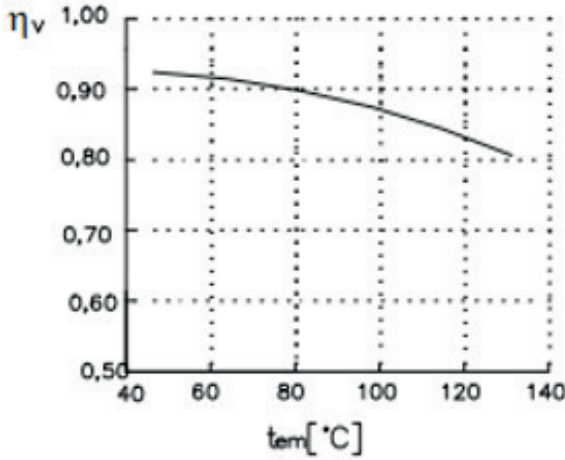
Burada \dot{m}_i (kg/s) çevrim başına silindirlere alınan emme havası ve yakıtın toplam kütle-sel debisini, ρ_i (kg/m³) emme havası ve yakıtın yoğunluğunu, V_d (m³) pistonun yer değiştirme hacmini, N (1/s) motorun devir sayısını ve son olarak 2 sabiti ise dört zamanlı bir motorda döngü başına gerçekleşen iki devir sayısını ifade etmektedir. Ancak direkt enjeksiyonlu bir motorda yakıt doğrudan silindir içerisine püskürtüldüğünden dolayı silindirlere gönderilen şarj dolgusunun kütle-sel debisi (\dot{m}_i), sadece emme havasının kütle-sel debisi olarak alınabilir ($\dot{m}_i = \dot{m}_a$).

İçten yanmalı motorlarda emme ve süpürme zamanında hem taze dolgu hem de artık gaz bir arada bulunur. Bu durum bir sonraki çevrimde silindirlere gönderilecek olan yeni taze hava dolgusu miktarının belirlenmesini ve akış rejimini etkiler. Bununla birlikte, artık gazlar ve sıcak yanma odası yüzeyi, taze hava dolgusunun sıcaklığını yükseltmekte ve genişleyerek alınan taze hava dolgusu hacminin daha az olmasına neden olmaktadır (Safgönül ve ark., 2013). Diğer yandan, atmosfer basıncının yükselmesi hava yoğunluğunu artırdığından dolayı, motor tarafından emilen taze emme havası miktarının artmasına sebep olmaktadır. Bu durumda artan hava yoğunluğu motorun hacimsel verimini iyileştirerek üretilen motor gücünün artmasını sağlar (Pulkrabek, 2004).

Hacimsel verim; yakıt, emme basıncı, emme havası sıcaklığı, artık gazların basıncı ve sıcaklığı, sıkıştırma oranı, süpürme sistemi, motor dizaynı ve ısı transferinden etkilenmiş karışım sıcaklığı gibi çok sayıda motor çalışma

parametresi tarafından etkilenmektedir (Heywood, 2018; Safgönül ve ark., 2013). Öyle ki, taze emme havasının sıcaklığı ön ısıtma işlemi ile artırıldığında silindir içi yanma düşük motor devirlerinde pozitif olarak etkilenirken, yüksek devir sayılarında hacimsel verimi düşürerek motor gücünün azalmasını sağlamaktadır (Chiu ve Horng, 1994). Özellikle dizel motorlarda daha belirgin olmakla beraber, soğutma suyu sıcaklığının veya motor yükünün artmasını tetikleyen herhangi bir parametreye benzer şekilde emme havası sıcaklığının artmasını sağlayacak her bir etken hacimsel verim değerinde düşüşe neden olmaktadır.

Sıkıştırma ateşlemeli motorlar için volumetrik verimin (η_v) değeri 0,8 ile 0,9 aralığında olmakla birlikte buji ateşlemeli motorlara kıyasla yüksek bir verim aralığına sahiptir (Heywood, 2018; Safgönül ve ark., 2013). Motorun taze emme havası giriş sıcaklığının hacimsel verimle olan değişimi Şekil 1'de detaylıca gösterilmiştir.



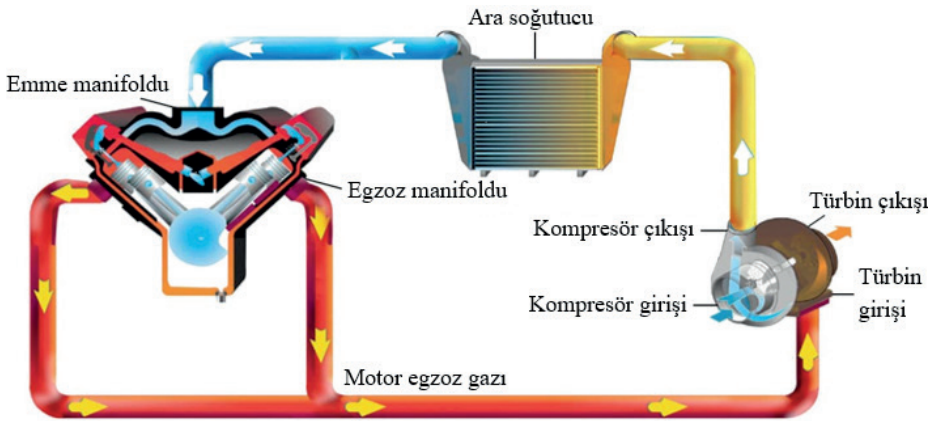
Şekil 1. Hacimsel verimin emme havası giriş sıcaklığı ile değişimi (Safgönül ve ark., 2013).

Artık gazların basıncının artması hacimsel verim üzerinde olumsuz etkilere neden olur. Egzoz kısmındaki aerodinamik kayıplar ve sürtünme direnci, gazların çıkış hızıyla ve devir sayısı ile ilişkili olduğundan aerodinamik kayıplar arttıkça artık gaz miktarı ve basıncıda artar. Böylece silindirlere giren taze hava miktarı düşer ve dolayısıyla hacimsel verimde azalma gerçekleşir. Bununla birlikte artık gaz sıcaklığının artmasına bağlı olarak silindir içerisinde kalan artık gazların kütlesi azalmaktadır. Dolayısıyla silindir içerisine girebilecek olan gazların miktarı artmakta ve böylece hacimsel verim değeri yükselmektedir (Safgönül ve ark., 2013). Diğer yandan, emme havası sıcaklığı ve basıncı azaldıkça sıkıştırma sonu değerleri ile birlikte ortalama değerler düşeceğinden dolayı tutuşma gecikmesi artar.

Özellikle düşük sıcaklıktaki bölgelerde motorun soğuk çalıştırma problemi ortaya çıkmaktadır. Çünkü düşük çevre sıcaklığında motor marş periyodu boyunca motor bileşenlerinin yüksek oranda ısı çekmesinden dolayı yakıt gerekli olan tutuşma sıcaklığına ulaşamaz. Bu durum, motorun emme ve sıkıştırma çevrimlerinde silindir içi düşük sıcaklığa ve ateşleme gecikme süresinde artışlara neden olmaktadır. Bu gibi problemlerin çözümünde emme sistemi hattında faz değiştiren malzemeler yardımıyla emme havası sıcaklığını yükseltmek gibi çeşitli teknikler geliştirilerek motorun marş periyodu boyunca silindirlere yüksek sıcaklıkta taze hava beslemesi sağlanır. Böylece çevre havasına göre daha yüksek sıcaklıkta olan emme havası üzerine püskürtülen yakıtın tutuşması kolaylaşır ve soğuk çalıştırma problemi iyileştirilebilir. Ancak motorun ısınma periyodu sonrasında hacimsel verimin düşmemesi için bu uygulama sonlandırılarak emme havası desteği çevre havasından sağlanmalıdır (Kaltakkıran ve Ceviz, 2021).

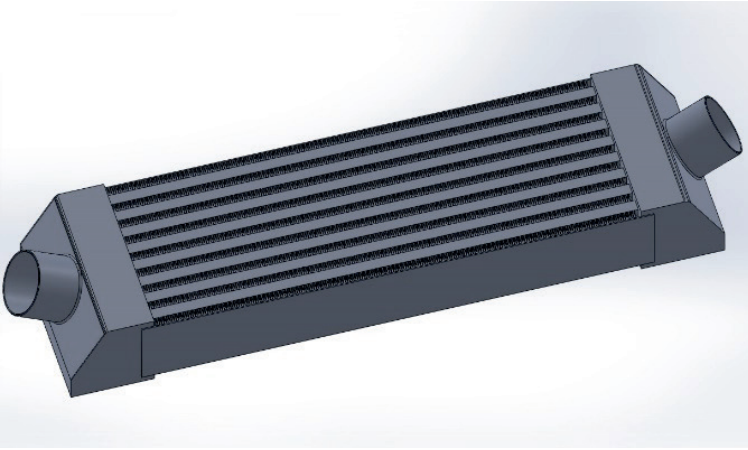
3. Motor Emme Havası Ara Soğutucusu (Intercooler)

İçten yanmalı motorlarda güç ve verimi artırmak amacıyla turboşarj veya süperşarj gibi bazı hava sıkıştırma ekipmanları kullanılmaktadır. Bu yolla emme havasının basıncı ve yoğunluğu artırılarak motordan üretilen gücün artması sağlanır. Ancak, buji ateşlemeli motorlarda vuruntu probleminden dolayı izin verilen kompresör basınç artışı sınırlıdır. Turboşarj ve süperşarjör sisteminde bulunan bir ara soğutucu veya diğer bir ifadeyle intercooler, temel olarak kompresör bileşeni ile sıkıştırma işlemi sonrasında sıcaklığı yükselen emme havasını soğutmak ve yoğunluğunu artırmak aynı zamanda da vuruntu eğilimini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır (Ferguson ve Kirkpatrick, 2015). İçten yanmalı bir motorun turboşarj ve ara soğutucusunun şematik görünümünün bir örneği Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. İçten yanmalı motorlarda turboşarj sistemi ve ara soğutucusu (Garrett, 2020).

Turboşarj veya süperşarjörden basınçlı ve yüksek sıcaklıkta motora gönderilen şarj havası emme manifolduna gönderilmeden önce ara soğutucu aracılığıyla soğutulur ve yoğunluğunun artması sağlanır. Ara soğutucu sayesinde emme havası sıcaklığı yaklaşık %70 düşürülür. Ayrıca ara soğutucu geniş bir ölçekte güç, tork ve güvenilirliği de artırır. Motor emme havası şarj sıcaklığının azaltılması daha soğuk emme havası meydana getireceğinden dolayı güç ve torkta bir artış sağlanır ve yanma sıcaklığı azalır. Modern turboşarjlı araçlar için bir ara soğutucu olmaksızın tipik emme hava sıcaklığı 100°C ile 2000°C arasında değişirken, iyi bir ara soğutucu soğutma sisteminin entegrasyonu ile bu sıcaklık aralığı yaklaşık 40°C-600°C bandına kadar düşürülebilir (Barman ve ark., 2011). Bir motorun güç ve torku, doğru oranda karıştırılmış yakıt-hava oranı ve yanma odasına giren havanın miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Öyle ki, bir ara soğutucu ile şarj havası sıcaklığının düşürülmesi yanma odasına daha yüksek bir miktarda hava kütlesi girişini sağlar. Bu durumda eğer araç doğru optimizasyonlara sahipse tork ve güçte artışlar gerçekleşir. Solidworks ortamında çizilmiş bir ara soğutucunun şematik görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Ara soğutucu şematik görünümü.

Ara soğutucu bulunmayan bir turboşarjlı araca göre iyi bir ara soğutucu sistemi entegre edilmiş bir aracın gücü %30 kadar artırılabilir (Barman ve ark., 2011; Ghaffarpour ve Baranescu, 1996). Emme havası sıcaklığının düşürülmesi ağır yük şartlarında bile silindir kafa sıcaklığının düşük olmasını, termal gerilmelerin azalmasını ve motor bileşenlerinin ömrünün uzamasını sağlar. Bununla birlikte emme havası sıcaklığındaki düşüş her bir indüksiyon stroku boyunca dolgu kütlesinin artışına ve motor gücünde yükselmeye neden olur. Bunun sonucunda emisyonlar açısından önemli bir parametre olan NO_x değerleri düşük yanma sıcaklığından dolayı azalır. Ayrıca şarj sıcaklığının azalmasından dolayı düşük devirlerde ve yüksek yüklerde dizel

motorlarda görülen siyah duman emisyonu da azalmış olur (Tan ve Lu, 2003).

Turboşarj türbininden çıkan yüksek sıcaklıktaki egzoz gazının belli bir miktarı EGR (egzoz gaz resirkülasyon) valfi aracılığıyla yeniden yanma işlemine dahil edilmek üzere emme manifolduna gönderilir. Yüksek sıcaklıktaki egzoz gazı emme manifolduna gönderilmeden önce EGR ısı değiştiricisinde soğutma suyu ile soğutulur. Ancak emme havasının sıcaklığına kıyasla EGR gazının sıcaklığı halen daha yüksektir ve bu şekilde emme manifolduna gönderilir. Ara soğutucuda sıcaklığı düşürülen emme havası emme manifoldunda sıcak EGR gazıyla karıştırıldığında sıcaklığı tekrar yükselir ve karışımın ısı kapasitesinde artışlar meydana gelir. Bu durum hacimsel verimin düşmesine neden olurken aynı zamanda tutuşma gecikmesini kısaltarak yanmamış HC değerlerinin düşmesini sağlar. Ancak silindir içi yanma sıcaklığı yükseldiği için NO_x emisyon üretim oranı artar. Daha yüksek EGR oranı ise emme havası oksijen yoğunluğunu azalttığı için tutuşma gecikme süresinin uzamasına neden olur. Böylece yanma süreci ve yakıt tüketimi önemli ölçüde olumsuz etkilenir. Bu yüzden araştırmacılar EGR oranı ve EGR gaz sıcaklığının motor performansı üzerindeki negatif etkilerini iyileştirmeye yönelik çeşitli teknikler geliştirmektedir (Kaltakkıran ve ark., 2023).

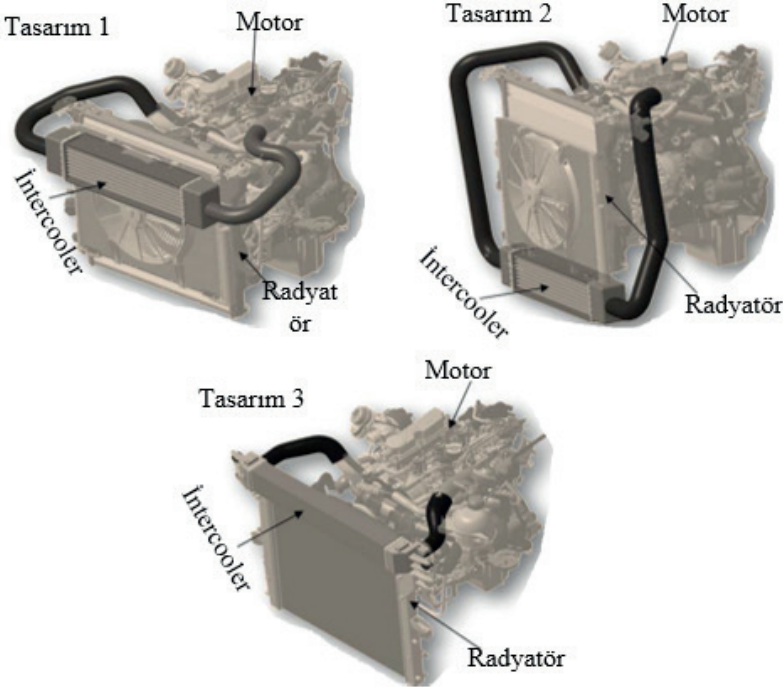
Emme havası yoğunluğundaki artış, silindirlere birim hacimde kütleli olarak daha fazla hava kütlelerinin girmesini sağlar ve bu da silindirde üretilen gücün artmasında hayati önem taşır. Bu yüzden bu etki ara soğutucu kullanım ihtiyacının en önemli sebeplerinden birisi olarak görülmektedir. Bununla birlikte motor çalışma süresi boyunca hem emme havası hem de soğutucu akışkan sıcaklık değerlerinde değişimler meydana gelmektedir. İçten yanmalı motorlarda bu parametrelerin sıcaklıklarının artması neticesinde HC emisyon değerleri azalırken, NO_x emisyonu değerleri artmaktadır. Ancak, özellikle düşük yüklerde daha belirgin olmakla beraber emme hava sıcaklığının soğutucu akışkan sıcaklığından daha etkili ve önemli olduğu görülmektedir (Torregrosa ve ark., 2006). Öyle ki, ara soğutucu hava çıkış sıcaklığı $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar artırılması neticesinde motor gücünde %50 kadar bir düşüş gerçekleşmekte ve bu da ara soğutucu etkinliğinin sıkıştırılmış şarj havası yoğunluğunu artırma kabiliyeti ile yakından ilişkilidir (Barman ve ark., 2011). Bir ara soğutucunun etkinliği ara soğutucudan elde edilen gerçek ısı transferinin, ara soğutucudan elde edilebilecek maksimum ısı transferine oranlanmasıyla belirlenir.

İçten yanmalı motorlarda emme havası soğutucusu işlevi gören ara soğutucu, motor bileşenlerinin çekirdek bir parçası olarak önemli bir etkiye sahiptir. Öyle ki, emme hava sıcaklığını düşürebilir, hava yoğunluğunu ve dolayısıyla yanma etkinliğini artırabilmektedir. Tüm bu etkilerinin yanı sıra ara soğutucu performansı zararlı emisyonların iyileştirilmesi ve çevrenin korunması noktasında da oldukça önemli bir rol üstlenmektedir (Zhang ve ark., 2016). Barman ve ark. (2011) egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi nok-

tasında 3,571 lt hacimli bir ara soğutucu üzerinde birtakım değişken şartlar altında yürüttükleri çalışmalarında emisyonlarla ilgili deneysel sonuçların detaylandırılmış analizini sunmuşlardır. Fan yardımıyla farklı pozisyonlarda hava akışları sağlanmış ve aracın bu değişken şartlarla birlikte ara soğutucu ve dolayısıyla emisyonlar arasında önemli bir ilişki olduğunu görmüşlerdir. Sonuçta, ara soğutucu etkinliğinin NO_x emisyonunda %7'lik bir iyileşme ile önemli bir rol oynadığı ancak CO, HC ve PM emisyonları üzerinde ise önemli bir etki göstermediği görülmüştür. Benzer bir diğer çalışmada Pan ve ark. (2015) çift yakıtlı bir motorun PID kontrollü ara soğutucu vasıtasıyla farklı emme havası sıcaklıklarında ve değişik miktarlarda ki metanol kullanımı ile motor performans ve emisyon karakteristiklerini araştırmıştır. Emme havası sıcaklığının artması CO, NO_2 , HC, metanol (CH_3OH) ve formaldehit (CH_2O) emisyonlarının azalmasına sebep olurken, diğer yandan bu durum NO, NO_x ve kurum emisyonu değerlerinde artışa neden olmuştur. Ayrıca emme havası sıcaklığının egzoz gaz sıcaklığı, emme hava kütlesi ve termal verim üzerinde belirgin etkilerinin olduğunu gözlemlenmiştir.

Şarj dolgusu sıcaklığının, motor performansı, motor silindir basıncı, yanma süresi, ısı salınım oranı ve egzoz emisyonlarını ne denli etkilediğini öğrenmek amacıyla Cinar ve ark. (2015) tarafından farklı emme havası sıcaklıkları ve farklı lamda katsayılarına göre bir araştırma yapılmıştır. Emme havası sıcaklığındaki yükselişle birlikte basınç ve ısı yayılım değerlerinin de yükseldiği görülmüştür. Ayrıca oksijen ve HC molekülleri arasındaki kimyasal reaksiyonlar emme havasının ısıtılmasıyla birlikte hızlanmıştır. CO ve HC emisyonları benzer davranışla yaklaşık 90°C emme şarj dolgusu sıcaklığına kadar önce artış eğilimi gösterirken daha sonra tekrar azalma eğilimi göstermişlerdir. Emme şarj dolgusu sıcaklığı 90°C üzerine çıkması durumunda daha hızlı silindir içi yanma reaksiyonlarının gelişeceğini ifade etmişlerdir.

Ranjan ve ark. (2016) bir aracın ara soğutucu etkinliğini, emme havası basınç düşüşünü ve ivmelenme performansını araştırmak amacıyla ara soğutucu, radyatör ve fan modüllerinin olduğu 3 farklı model geliştirmişlerdir. Yürüttükleri çalışmada avantaj ve dezavantajlarıyla birlikte ara soğutucu için optimum bir konum belirlenmeye çalışılmış olup, belirlenen konumlar Şekil 4'te gösterilmiştir.



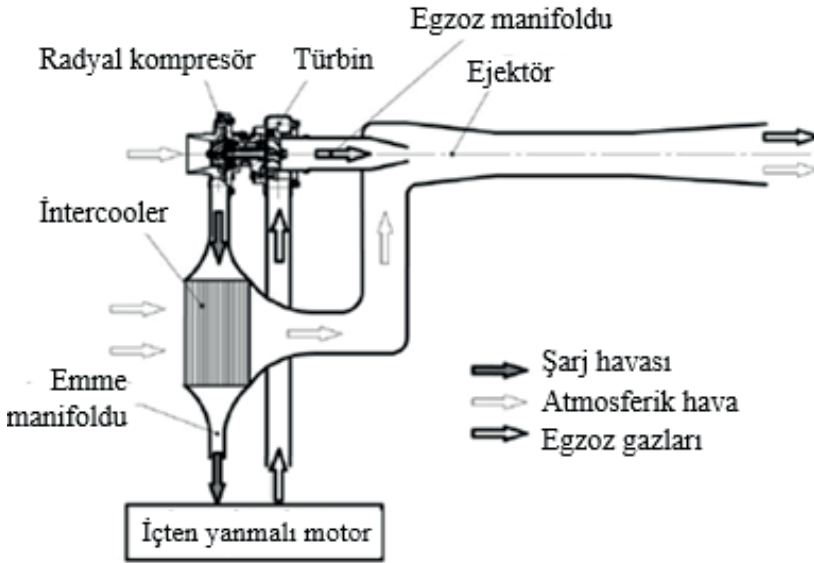
Şekil 4. Üç farklı ara soğutucu entegre modeli (Ranjan ve ark., 2016).

İlk yapılan tasarımda ara soğutucu radyatörün üst kısmına yerleştirilmiştir. Bu tasarımın radyatöre ek ısı yükü getirmesi yanı sıra çap ve güç bakımından daha büyük bir radyatör ve fana ihtiyaç duyulmuştur. İkinci tasarımda ara soğutucu radyatörün tam altına yerleştirilmiştir. Burada havanı kısıtlanması daha az olduğundan dolayı fan ve radyatör ihtiyacında azalma ve yakıt tüketiminde iyileşme potansiyeli belirlemişlerdir. Avantaj olarak yüksek ara soğutucu etkinliği elde edilmiş ve şarj sıcaklığı elimine edilmiştir. Ayrıca radyatör ve fan boyutu optimizasyon imkânı sağlanmıştır. Ancak kompleks hortum ve yönlendirmeleri, ara soğutucu koruma muhafazası, sızdırmazlık, yüksek basınç düşüşleri ve maliyet önemli dezavantajlar olmuştur. Son tasarımda ise ara soğutucu radyatörün tam üzerine yerleştirilmiş ve ikinci düzenekteki ile aynı faydaları sağlamıştır. Diğer iki tasarıma kıyasla bu tasarım ile daha az hava giriş basıncı düşüşü sağlanmıştır. Bu tasarımın hava sirkülasyonu ve sızdırmazlık ihtiyacı gibi bazı önemli dezavantajlarının olduğu belirtilmiştir.

Ara soğutucu etkinliği, motor verimliliği ve zararlı egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi noktasında üzerinde durulan bir konudur. Öyle ki, Shah ve ark. (2009) değişken geometrili bir turboşarjıya sahip bir dizel motorun emme havasının su enjeksiyonu yoluyla soğutulması ve ara soğutucu kullanılması arasındaki bağıl emisyon üretimini karşılaştırmıştır. Bu doğrultuda, ilk iki

konfigürasyonda motor üzerindeki ara soğutucu önce pasif sonra aktif hale getirilmiş ve en son konfigürasyonda ise su enjeksiyonu işlemi gerçekleştirilmiştir. Emme dolgusu soğutulduğunda, hava yoğunluğu artarak hava kütle akış hızında bir artışa sebep olmuştur. Böylelikle bu durumun termal kısılma etkisi yaratarak NO_x emisyonlarında azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.

Turboşarjırdan emme manifolduna gönderilen basınçlı havanın soğutulmasının güç, yakıt etkinliği, hava yoğunluğu ve miktarı, zararlı emisyonlar ve egzoz gaz sıcaklığı üzerinde olumlu katkıları bulunmaktadır. İçerisinden geçirilen emme havasının daha etkin bir şekilde soğutulması için ara soğutucu motor destekli bir fan yardımıyla hava akışına maruz bırakılabilir. Ancak bu uygulama için kullanılan fan motorda bazı güç kayıplarına sebebiyet verebilmektedir. Bu güç kaybının telafi edilmesi noktasında Lazarev ve ark. (2016) motorun kayıp enerji yüzdesi üzerine odaklanarak fan yerine motorun kayıp egzoz enerjisini kullanarak hava akışını sağlayan ejektör uygulamasına yönelmişlerdir. Bu bağlamda, yüklü hava akışı ve ara soğutucu soğutma havası akışını sağlamak amacıyla deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Ayrıca motor simülasyon modelleri için üç farklı durum (rölanti, nominal güç ve maksimum tork) belirlemişlerdir. Uygulanan ejeksiyon sistemi ve ara soğutucu için bir verim ifadesi türetilmiş olup, ara soğutucu verimine bağlı olarak ejektör sisteminin etkinliğinin tahmin edilebileceğini ifade etmişlerdir. Ejektör ile emme havasının soğutulmasına dair deneysel düzeneğin şematik görünümü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Ejeksiyon sistemi ile emme havası soğutma prosedürü (Lazarev ve ark., 2016).

Ara soğutucu üzerine yürütülen çalışmalar arasında deneysel araştırmaların yanı sıra sayısal analiz çalışmaları da yer almaktadır. Özellikle FLUENT yazılımı çeşitli ara soğutucu tipleri için emme havası akışının sayısal incelemesini mümkün hale getirmektedir. Bu doğrultuda Toporcer ve ark. (2010), turboşarjlı içten yanmalı bir motorun ara soğutucu bileşeninin optimizasyonu ile ilgilenmişlerdir. Ara soğutucu için CATIA ortamında üç boyutlu bir model hazırlanarak gerekli sınır koşullarının belirlenmesinin ardından modelin simülasyonu yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre soğutucu akışkanın ve emme havası akış hızının maksimum değerlerinin sırasıyla ara soğutucu boru giriş alanında ve ara soğutucu giriş alanında olduğu görülmüştür. Ayrıca araştırmacılar analiz yardımıyla ara soğutucu içerisinde türbülanslı akışın yüksek olduğu yerlerin belirlenmesinin kolaylaşacağını ve bu bilginin ara soğutucu optimizasyonu aşamasında önemli bir parametre olarak kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

FLUENT yazılımının kullanıldığı diğer bir çalışmada Zhang ve ark. (2016) kanat-borulu ara soğutucu da sıcaklık ve basınç gibi akış ve ısı transferi karakteristiklerinin sayısal ve deneysel incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre hava akış oranının artmasıyla birlikte ısı transfer kapasitesi ve basınç düşüşünde artışların olduğu görülmüştür. Gerçek bir ara soğutucu için CFD analizi yapıldığında sıcak emme şarj dolgusunun borulardan geçirilen su tarafından soğutulmasıyla elde edilen sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Öyle ki, emme havası sıcaklığı ara soğutucu öncesinde 90°C iken soğutma sonrasında ara soğutucu çıkışında 44°C olarak elde edilmiştir. Ara soğutucudan geçirilen emme havasını soğutmak amacıyla kullanılan suyun sıcaklığında ise 10°C'lik bir sıcaklık artışı gerçekleşmiştir. Basınç dağılımı incelendiğinde ise en büyük basınç değerlerinin soğutma suyunun borulara giriş bölgesinin son bölümünde olduğu görülmüştür. Ayrıca akış oranı ile basıncın doğru orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir.

Motor verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda ara soğutucu performansının artırılması hem üreticiler hem de araştırmacılar için önemli bir uğraştır. Bu amaç için ilk başvurulan yöntemlerden birisi yeni bir ara soğutucu tasarımıdır. Bu doğrultuda Djemel ve ark. (2023) tarafından çapraz akışlı plaka kanatlı ara soğutucu için yeni bir tasarım geliştirilerek CFD analizi ile termal performansı araştırılmıştır. Esasen solunum sisteminden yola çıkarak ara soğutucunun iç ve dış soğutma kanalları içerisine Y şeklinde yeni biyonomik engeller eklenmiştir. Böylece akışkanın ve oyulmuş şeklin termal performans etkilerini araştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre klasik ara soğutucu modeline kıyasla önerilen yeni biyonomik model sayesinde termal etkinlik %97,66 oranında iyileştirilmiştir. Ara soğutucu temel olarak emme havası sıcaklığını azaltarak hem motor termal veriminin iyileşmesine hem de emisyonların azalmasına katkı sağlamıştır.

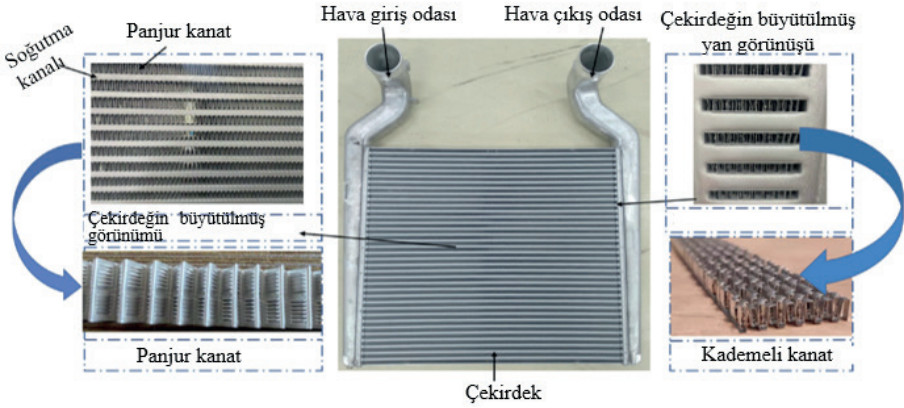
Araştırmacılar kullanılan yaygın ara soğutucu tiplerinin yanı sıra tasarlanmış yeni tip ara soğutucuların performanslarını da deneysel veya sayısal analizler ile araştırmaya yönelmektedirler. Öyle ki, Ikhtiar ve ark. (2023) yeni tip bir ara soğutucunun etkinliğini incelemek amacıyla geliştirdikleri dört farklı modelin performans analizini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu amaçla öncelikle birbirinden farklı en-boy oranlarına (21,6 mm, 27 mm, 36 mm ve 43,2 mm) sahip ara soğutucu modelleri belirlemişlerdir. Ara soğutucu için 45 °C sabit emme havası sıcaklığı sağlanarak tüm modellerin sıcaklık düşüşü, basınç düşüşü, ısı transferi ve logaritmik ortalama sıcaklık farkı gibi kriterlere dayalı olarak minimum basınç kaybı ile yüksek ısı transferi değerlerini amaçlamışlardır. Analiz sonuçlarına göre logaritmik ortalama sıcaklık farkı haricindeki diğer parametrelerin ara soğutucu en-boy oranıyla doğru orantılı bir ilişkisinin olduğu görmüşlerdir. Ayrıca diğer bir sonuç olarak, tasarlanan ara soğutucular kompakt yapılarından dolayı birim hacimde barındırdıkları daha fazla yüzey alanı ile geleneksel ara soğutuculara kıyasla daha yüksek termal kapasite sağlamışlardır.

Geliştirilen ara soğutucuların performanslarını belirlemede atılan ilk adım genellikle ısı değiştiricisinin toplam ısı transferi katsayısının belirlenmesi ile sıcaklık ve basınç düşüşlerinin incelenmesi şeklindedir. Bu amaçla Lajqi ve ark. (2009) farklı formlarda ki çeşitli ara soğutucuların turboşarjlı bir dizel motor üzerinde performans etkilerini incelemişlerdir. Toplam ısı transfer katsayısına bağlı olarak geliştirdikleri üç farklı formdaki ara soğutucu için silindir içerisindeki sıcaklık ve basınç düşüş limitlerini araştırmışlardır. Çeşitli çalışma şartlarında hacimsel verim ve motor gücünün yanı sıra MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon sonuçlarına göre ara soğutucu performansının da iyileştiği görülmüştür.

Ara soğutucunun yapısal formundan dolayı içerisinde geçen türbülanslı emme havası akışının termal ve hidrodinamik davranışlarının belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu davranışsal etkilerin belirlenmesi noktasında FLUENT gibi yazılımlar akışın üç boyutlu sayısal incelemesinin yapılmasını mümkün kılmaktadır. Djemel ve ark. (2017) tarafında yapılan örnek bir çalışmada, girdap üreteçli ve üreteçsiz ara soğutucuların iki ayrı 3 boyutlu modeli incelenmiştir. Çalışmada geometrik konfigürasyon GAMBIT yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre, klasik ara soğutucu performansına kıyasla değişken geometrili girdap üreteç kanatçık çiftlerinin kullanılmasının ara soğutucu performansını artırdığını belirlemişlerdir.

Çeşitli tiplerde üretilen ara soğutucuların ısı transfer etkinliklerini iyileştirmeye yönelik olarak içerisindeki kanatçık veya düz boruların yapısal parametrelerinin optimize edilmesi etkili bir yöntemdir. Bunun yanı sıra ısı transfer etkinliğini iyileştirmek adına hava akışı dağılımının olabildiğince homojen bir formda olması da oldukça önemli bir faktördür. Ara soğutucu

işlevini özellikle ağır hizmet taşıtı motorunda tam anlamıyla yerine getirebilmesi için içerisindeki zayıf hava akışının iyileştirilmesi ve dolayısıyla ısı transferi performansının artırılması gerekmektedir. Hem akış rejiminin homojenliği hem de etkinliğinin artırılması için ara soğutucu içerisinde çeşitli boyutlarda ve yapılarda tasarlanan kanatçık uygulamaları öne çıkan bazı tekniklerdir. Bu teknikler dahilinde Tang ve ark. (2022) yürüttükleri çalışmalarında ağır hizmet tipi bir aracın ara soğutucu soğutma borusundaki havanın akış homojenliğini çözmek amacıyla kılavuz kanat tekniği geliştirmişlerdir. Farklı yapısal parametre şartları altında yenilikçi bir uçtan uca tahmin modeline dayalı olarak kılavuz kanadın performans etkileri değerlendirilmiştir. Burada bir yandan kılavuz kanadın yapısal parametrelerinin optimizasyonu yapılırken, diğer yandan zaman ve maliyetler açısından çok zahmetli olan deneyler ve CFD analizlerinin yanı sıra yenilikçi bir yöntem olan uçtan uca tahmin modeli sayesinde ara soğutucunun yapı ve performans parametreleri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Sonuçta, optimize edilen ara soğutucu doğrulanmış ve hava akışı tekdüzelik katsayısının 0,983 ile orijinal tasarıma kıyasla %5,25 daha yüksek bir performans göstererek ara soğutucu çıkış havası sıcaklığının 8,2 °C kadar azaldığı belirlenmiştir. Çalışmada incelenen ara soğutucu genel görünüşü, hava giriş-çıkış hatları ve kanat profilleri Şekil 6'da detaylıca gösterilmiştir.

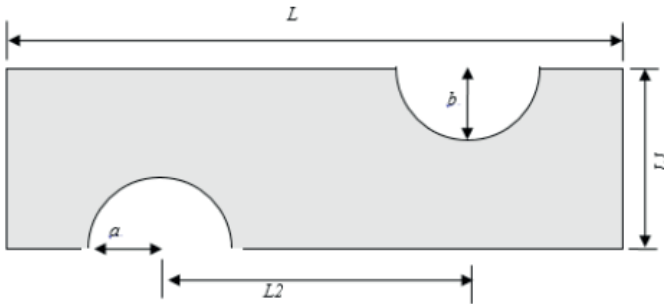


Şekil 6. Ara soğutucunun detaylı genel görünümü (Tang ve ark., 2022).

Turboşarj sistemi bulunan motorlarda emme havasının giriş sıcaklığının azaltılması yanma performansının iyileşmesini desteklemektedir. Bu faydanın belirlenmesine yönelik olarak öncelikle odaklanılması gereken ilk parametre ara soğutucu tipi ve ısı transferi etkinliğidir. Araştırmacılar tarafından çeşitli yapıda tasarımlara sahip ara soğutucuların performanslarının incelenmesi genel bir yaklaşım haline gelmiştir. Bu bağlamda Öner ve Öz (2021) turbonun kompresör çıkışındaki emme havası sıcaklığını düşürmek amacıyla

iki farklı tipte borulu ara soğutucu modeli tasarlamışlardır. Çalışmalarında CFD analiz yardımıyla aynı akışkan için değişken hız şartlarında ara soğutucu ısı transfer performansını belirlemeye çalışmışlardır. Emme havası ve ara soğutucu soğutma akışkanının farklı hızları için ara soğutucu gövdesine dairesel ve elips yapıya sahip hava akış kanalları yerleştirilerek tasarlanan kanal geometrilerinin birbirleriyle olan etkileşimlerini incelemiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, dairesel forma kıyasla elips forma sahip hava akış kanalları sayesinde ısı transferi iyileşerek soğutma etkinliği yaklaşık %10 artmıştır. Şarj havasını soğutmak için ara soğutucu yüzeyinde sirküle edilen akışkanın hızının ısı transferi performansı üzerinde etkili bir parametre olduğunu belirlemiştir. Bununla birlikte emme havasının ara soğutucu giriş hızının 21 m/s'den 25 m/s'ye çıkarılmasının ısı transferini olumsuz yönde etkileyerek ara soğutucu geometrisi veriminin yaklaşık %1 düşmesine neden olmuştur. Ayrıca elips kesitli akış kanallarının soğutma performansı etkinliğinin daha iyi olmasından dolayı yeni ara soğutucu üretimlerinde bu formdaki kanalların kullanılmasının fayda sağlayacağını vurgulamışlardır.

Otomobil ve ağır hizmet araçlarının yanı sıra ulaşım ve taşımacılık sektörlerinde önemli bir pay sahibi olan ve raylı sistemlerde kullanılmakta olan lokomotif dizel motorlarının turboşarj sistemlerinde ara soğutucu önemli bir soğutma sistemi bileşeni olarak yerini almaktadır. Bu tip bir lokomotif motordunda hacimsel verimin iyileştirilmesi arzu edilen bir durumdur. Bu duruma istinaden Apaydın ve ark. (2017) 16 silindire sahip bir dizel lokomotif motorunun hacimsel verimliliğini artırmak maksadıyla ara soğutucu tasarlamışlardır. FLUENT yazılımının yardımıyla 12 farklı prototip ara soğutucu tasarlayarak motor üzerinde performans testlerini gerçekleştirmiş ve optimum bir ara soğutucu tasarımı belirlemeye çalışmışlardır. Test sonuçlarına göre belirlenen optimum ara soğutucu veriminin %96 olduğunu ve motor üzerindeki ara soğutucu ile kıyaslandığında emme havası sıcaklığının %16 kadar düştüğünü bildirmişlerdir. Çalışmada kullanılan ara soğutucuya ait ana hesaplama alanı ve geometrik parametrelerinin gösterildiği şematik görünüm Şekil 7' de verilmiştir.



Şekil 7. Ara soğutucu ana hesaplama alanı ve geometrik parametreleri (Apaydın ve ark., 2017).

Motorun emme zamanında manifolduna gönderilen taze havanın basıncının artırılması aynı zamanda havanın sıcaklığını artırmaktadır. Ancak etkin bir ısı transferi performansına sahip ara soğutucu ile emme havası sıcaklığı düşürülerek hacimsel verimin artırılması sağlanabilir. Burada önemli olan ana husus emme havası sıcaklığının basınçlı, ancak olabildiğince çevre havası sıcaklığına yakın bir değere sahip olmasıdır. Bu amaçla Muqem (2012), motor ön panelde bulunan klima sistemi üzerinde bazı değişiklikler yaparak soğutucu akışkanın ara soğutucu yüzeyinden ısı çekmesini sağlayarak emme havasının soğutulmasını sağlamıştır. Böylece emme havası soğutma işlemi hem ara soğutucu kanatçıkları içerisinde dolaşan hava akımı ile hem de klimanın soğutucusu ile gerçekleştirilmiştir. Ara soğutucunun normal hava desteğiyle soğutulması tekniğinde emme havasının oksijen içeriği 1,43 kat artarken, çalışmada sunulan yeni tip ara soğutucu soğutma metodu ile emme havasının oksijen içeriğinin 2,618 kat arttığı belirlenmiştir. Nihayetinde bu durum hava yakıt karışımının yanma hızının ve egzoz emisyon değerlerinin iyileşmesine katkı sağlamıştır.

Emme havası ve ara soğutucu termal etkinliğinin iyileştirilmesine yönelik yürütülen çalışmalar motorun sabit çalışma şartlarının yanı sıra motorun değişken çalışma şartları altında da yürütülmüştür. Bu doğrultuda, çapraz akışlı bir ara soğutucunun termal etkilerini araştırmak amacıyla Hribernik and Moskwa (2000) iki boyutlu bir ısı değiştiricisi geliştirmişlerdir. Geliştirilen ara soğutucu modelinde hem emme şarj dolgusu hem de ara soğutucu soğutma akışkanının sirkülasyonu için ara soğutucunun içerisi ayrı kanallara ayrılmıştır. Her bir kanaldaki kararsız sıkıştırılabilir akışın analizini iki adımlı Lax-Wendroff diferansiyel yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda, sıcaklık dağılımının iki boyutlu incelemesini yapabilmek için Saul'yev açık yöntemini kullanmışlardır. Hazırladıkları ara soğutucu modelinin doğrulamasını motorun kararlı durum çalışma şartlarında ısıtma ve soğutma testleriyle yapmışlardır. Başarıyla sonuçlanan doğrulama testlerinin ardından ara soğutucu performansını motorun kararsız çalışma şartları altında incelemek için bir motor çalışma çevrimi simülasyonu kullanmışlardır. Bunun yanı sıra elde edilen sonuçların ara soğutucunun kararlı durumda çalıştığı kabulünü esas alan NTU-etkinlik yöntemiyle hesaplanan sonuçlarla kıyaslamaları yapılmış ve emme havasının ara soğutucu çıkış sıcaklıkları arasında ciddi değişkenlikler görülmüştür. Sonuçta, ara soğutucunun performans sonuçlarının NTU-etkinlik yöntemiyle karşılanmadığını belirterek motorun kararsız çalışma koşullarında iki boyutlu ara soğutucu modelinin kullanılmasının daha etkin sonuçlar sağlayacağını vurgulamışlardır.

Turboşarj sisteminin önemli bir parçası olan ara soğutucu görünüm olarak motor soğutma sisteminin etkin bir bileşeni olan radyatörle benzerlik göstermektedir. Çalışma prensibi açısından bir radyatör, motorun çalışma periyodu boyunca ısınan motor bloğunu soğutma suyu vasıtasıyla soğutur-

ken, bir ara soğutucu basınçlandırılmış bir şekilde motora gönderilen emme havasının sıcaklığını düşürmekle görevlidir. Çünkü turbo kompresörü tarafından gönderilen hava ortam havasına göre çok daha sıcaktır. Ara soğutucunun temel işlevi tam olarak bu noktada önem kazanmaya başlar. Öyle ki, yüksek sıcaklıktaki motor emme havasını soğutarak daha düşük sıcaklıkta emme manifolduna gönderilmesini sağlar. Motorun verimliliği için önemli bir parametre olan ara soğutucunun soğutma etkinliğini artırmaya yönelik olarak Mifdal ve ark. (2015) yeni bir ara soğutucu soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde, ara soğutucu içerisindeki emme havası sıcaklığındaki artış sensörler tarafından otomatik olarak algılanmakta ve bir elektronik kontrol ünitesi tarafından sprinkler aracılığıyla ara soğutucu üzerine su püskürtme işlemi gerçekleştirilmektedir. Araştırmacılar çeşitli sensör ve kontrolcülerin entegre edildiği bu yeni tip ara soğutucu prototipi ile emme havası sıcaklığı üzerinde kontrol sağlamışlardır. Böylece emme manifolduna gönderilen emme havasının sıcaklığı düşürülerek yanma için yüksek yoğunluklu oksijen içeriği sağlanmaktadır.

Turboşarjlı motorlarda ara soğutucunun mevcut performansının iyileştirilmesi yanı sıra emme sisteminin bütün bir halde iyileştirilmesine yönelik literatürde çeşitli optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalar arasında emme sistemine entegre edilmiş harici bir soğutma sistemi bileşeni olan ara soğutucu önemli bir odak noktası olmuştur. Bu bağlamda, ara soğutucunun akış direnci, basınç ve ısı değişim performanslarını değerlendirmek amacıyla Liu ve Zhang (2020) farklı yapıdaki ara soğutucuların CFD analizlerini yapmışlardır. Motorun emme boruları ile ara soğutucunun birleşimi düşünülerek, bu sistemin entegre tasarımı gerçekleştirilmiş ve ara soğutucuların akış özellikleri farklı tasarım şemaları kapsamında detaylıca incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre en iyi performans sergileyen tasarım belirlenmiştir. Belirlenen bu ara soğutucu ve emme sisteminin motorun kararlı ve geçici çalışma şartları altındaki performansları deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar entegre edilen ara soğutucu giriş sistemi sayesinde toplam giriş sistemi hacminin yaklaşık %38,3 azaldığını ve ayrıca ara soğutucu ile emme manifoldu arasındaki basınç kaybının ise yaklaşık %37,5 kadar azaldığını göstermiştir. Ayrıca yeni entegre ara soğutucu giriş sistemi ile motorun kararlı çalışma durumunda fren özgül yakıt tüketimi nominal şartlarda 5,9 g/kWh azaltılarak performansı iyileştirilmiştir. Aynı zamanda motorun değişken çalışma performansında da iyileşmeler elde etmişlerdir. Araştırmacılar son olarak, entegre ara soğutucu giriş sisteminin küçük ve orta çaplı sıralı motorlarda kullanılması durumunda motor performansının iyileşeceğini belirtmişlerdir.

Araştırmacılar ve üreticiler farklı türde ve amaca yönelik olarak geliştirmiş oldukları ara soğutucuların performans değerlendirmelerini yapabilmek için ara soğutucu akışkanının dinamik akış özelliklerini derinlemesine incelemek-

tedirler. Ancak bu konudaki araştırmalardan bazıları kara araçlarının aksine uçak motoru ara soğutucuları üzerine odaklanmıştır. Öyle ki, uçak motoru tasarımlarında, ara soğutucu gibi çeşitli ısı değiştiricilerin yüksek enerji verimliliğinin ve aerodinamik özelliklerinin optimizasyonunun sağlanması önemli bir teknolojidir. Bu doğrultuda Zhao ve ark. (2017) borulu tip uçak motoru ara soğutucusunun akışkan dinamiği özelliklerini incelemişlerdir. Prototip olarak geliştirilen ara soğutucudaki detaylı akış alanını, parçacık görüntülü hız ölçümü ve basınç ölçümüyle analiz etmişlerdir. Öncelikle gözenekli ortamın boru şeklindeki bölümlerinin içerisindeki akış dağılımını belirlemeye çalışmışlardır. Elde edilen ölçümler ilgili bölümlerdeki akış dinamiğinin gözenekli ortam CFD modellemesi yaklaşımıyla iyi bir şekilde tanımlanabileceğini göstermiştir. Böylece araştırmacılar çeşitli ara soğutucu tasarımları için akışın yüksek hıza sahip olduğu özellikle kesişme noktası ve içeri akış kılavuz kanadına yakın kritik bölgelerin aerodinamik özelliklerini incelemişlerdir.

Son dönemlerde uçak motoru ara soğutucusu üzerine yürütülen bir diğer çalışmada Liu ve ark. (2020) ara soğutucu ısı transfer performansının irtifa ile olan etkileşimini inceleyerek bu durumun piston motorlu bir uçağın performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla öncelikle üç boyutlu bir CFD simülasyonu ile ara soğutucunun bu etkilerini belirlemeye çalışmışlardır. Ayrıca simülasyon sonuçlarının doğruluğu test verileriyle karşılaştırıldığında maksimum hatanın %10'un altında olduğunu görmüşlerdir. İrtifa değeri simülasyonda 20 km'ye kadar çıkarıldığında analizler neticesinde her 1 km'lik irtifa kaybında ara soğutucu veriminin ortalama %1,98 azaldığını görmüşlerdir. Ardından irtifa 11 km'ye kadar düştüğünde ara soğutucu veriminin %3,26 azaldığı belirtilmiştir. Bu sonuçlara göre ara soğutucunun ısı transfer veriminin atmosferik yoğunluğun yüksek olduğu irtifalarda sıcaklık farkının yüksek olmasından dolayı arttığını bildirmişlerdir. Ancak irtifa stratosfer yüksekliğine kadar çıkarıldığında ise sıcaklık değişiminin durması ve atmosferik yoğunluğun yere kıyasla 1/14 seviyelerine kadar düşmesi nedeniyle ara soğutucunun ısı transfer veriminin düştüğünü söylemişlerdir. Çalışmadan elde edilen veriler ışığında rakıma bağlı olarak ara soğutucu ısı transfer verimliliğinin belirlenmesi için ampirik bir model geliştirmişlerdir.

Ara soğutucu esas olarak motor emme sisteminde bir ısı değiştiricisi görevi görmektedir. Bu yüzden bu ekipmanın performansının iyileştirilmesi ve geliştirilmesi noktasında bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Literatürde yürütülen araştırmalar incelendiğinde ısı değiştirici problemleri temel olarak iki kısma ayrılmıştır. Bunlardan ilki, ısı değiştiricilerin tasarlanma problemleridir. Burada ısı değiştiricide kullanılan akışkanların giriş-çıkış sıcaklıkları, akışkan debileri ve akışkanın ısı değiştiriciden çıkış sıcaklığı gibi değerler belirlenir ve bu çıkış sıcaklığını sağlayabilecek yetkinliğe sahip ısı değiştiriciler tasarlanır. İkinci kısım problemler olarak, ısı değiştiricilerin ısı transfer etkinliklerinin değerlendirilmesi ve performanslarının deneysel veya sayısal

analizler ile iyileştirilmesidir. Isı değiştirici etkinliği için öncelikle ısı transferi, akışkanın çıkış sıcaklığı, giriş sıcaklığı ve akışkan debisi için hesaplanır ve problemin çözümünde çoğunlukla NTU-etkinlik yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, ısı değiştiricinin performansı iyileştirilirken aynı zamanda akışkanın basınç değerlerinde düşüşler ve akışkanın pompalanması için ihtiyaç duyulan güç gereksiniminde artışlar yaşanabilmektedir. Sonuç olarak, kullanım yeri ve amacına istinaden bir ısı değiştirici seçiminde ısı transfer kapasitesi, pompalama gücü, maliyet, ağırlık ve boyut gibi birçok faktör önem arz etmektedir (Altınışık, 2004; Bergman ve ark., 2015; Çengel, 2015).

4. Sonuç

Teknolojinin ilerlemesi ve elektrikli araçlara olan talebin giderek artmasına rağmen başta taşımacılık ve ulaşım olmak üzere halen birçok sektörde etkin bir şekilde kullanılan içten yanmalı motorlara yönelik araştırmalar hız kesmeden devam etmektedir. Ancak artan endüstriyel ihtiyaçların karşılanabilmesi ve içten yanmalı motorların bu beklentilere yeterince cevap verebilmesi için performanslarının sürekli olarak geliştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle motor performansı ve egzoz emisyonlarına yönelik yürütülen teknolojik araştırmalar güncelliğini korumaya devam etmektedir. Bu doğrultuda literatürde içten yanmalı motorlar üzerine yürütülen çalışmalar içerisinde emme sisteminde önemli bir bileşen olan emme havası ara soğutucusuna yönelik olarak çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar genel olarak ara soğutucunun performansının geliştirilmesi ve doğrudan motor verimliliği ve çevreye salınan zararlı egzoz emisyon bileşenlerinin iyileştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Yapılan çalışmalar otomobil, ağır hizmet araçları ve lokomotif motorlarının yanı sıra uçak motoru ara soğutucularının ısı performanslarının iyileştirilmesi çalışmalarını içerisine dahil etmektedir.

Literatürde yürütülen çalışmalarda ara soğutucuların mevcut ısı transfer kapasiteleri deneysel veya çeşitli analiz yazılımları ile sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmalar, farklı ara soğutucu tasarımlarının geliştirilmesi, mevcut veya geliştirilen ara soğutucu modellerinde kanatçık uygulamaları, ara soğutucunun boyutsal ve hacimsel değişimlerinin etkilerinin incelenmesi, farklı akışkanların ara soğutucu yüzeyine püskürtülmesi ile etkin soğutma performansının iyileştirilmesi, ara soğutucunun konumlandırılması, aerodinamik analizlerinin yapılması, ara soğutucu akış kanallarının tasarımı ve ara soğutucu akış kanallarının kesit optimizasyonu gibi bir çok farklı konuda gerçekleştirilmiştir.

Bu konuda yapılan çalışmalar neticesinde birim güç başına tüketilen yakıt tüketimi, motor verimliliği, kirlenici emisyonlar ve sebep olduğu çevresel etkileri iyileştirilerek, hem içten yanmalı motor teknolojisinin gelişmesine destek sağlanabilir hem de gelecek nesillere yaşanabilir ve daha temiz bir çevre bırakılabilir.

KAYNAKÇA

- Altınışık, K. (2004). Uygulamalarla Isı Transferi. *Nobel Yayın Dağıtım*, 242s.
- Apaydın, Ş., Ramazan, K. ve Aydın, Ö. (2017). Dizel Lokomotif Motorunda Ara Soğutucu Modernizasyonu. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 43–50.
- Barman, J., Ghodke, P. ve Joseph, J. (2011). *Evaluation of Intercooler Efficiency as a Technique for Reducing Diesel Engine Emissions*. SAE Technical Paper.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. ve Dewitt, D. P. (2015). *Isı ve kütle geçişinin temelleri*. Palme.
- Çengel, Y. A. (2015). *Isı ve kütle transferi: esaslar ve uygulamalar*. Palme Yayıncılık.
- Cengiz, Ö. ve Ali, Ö. Z. (2021). Determination of Optimum Operating Conditions of Different Types of Intercooler Designs in Supercharged Engines. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 5(4), 424–430.
- Chiu, C. P. ve Horng, R. F. (1994). Effects of intake air temperature and residual gas concentration on cycle-to-cycle combustion variation in a two-stroke cycle SI engine equipped with an air-assisted fuel injection system. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 37(4), 957–965.
- Cinar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Sahin, F., Polat, S. ve Yilmaz, E. (2015). Effects of intake air temperature on combustion, performance and emission characteristics of a HCCI engine fueled with the blends of 20% n-heptane and 80% isooctane fuels. *Fuel Processing Technology*, 130, 275–281.
- Djemel, H., Chtourou, S. ve Baccar, M. (2023). Three-dimensional numerical study of a new intercooler design. *International Journal of Thermofluids*, 17, 100263.
- Djemel, H., Salem, M. Ben, Baccar, M. ve Mseddi, M. (2017). Three-dimensional numerical study of the performance of the intercooler equipped with vortex generators. *Heat Transfer Research*, 48(8).
- Ferguson, C. R. ve Kirkpatrick, A. T. (2015). *Internal combustion engines: applied thermosciences*. John Wiley & Sons.
- Garrett. (2020). Garrett performance intercoolers. 16 Haziran 2023 tarihinde <https://www.garrettmotion.com/news/newsroom/article/garrett-performance-intercoolers-heat-transfer-and-selecting-the-correct-core/> adresinden erişildi.
- Ghaffarpour, M. ve Baranescu, R. (1996). *NOx reduction using injection rate shaping and intercooling in diesel engines*. SAE Technical Paper.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education.
- Hribernik, A. ve Moskwa, J. J. (2000). Transient response of a cross-flow charge air intercooler and its influence on engine operation. *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, 122(3), 483–489.

- Ikhtiar, U., Hairuddin, A. A. Bin, Asarry, A. Bin, Rezali, K. A. B. M. ve Ali, H. M. (2023). Numerical investigation of lamella heat exchanger for engine intake charge air cooling utilizing refrigerant as coolant medium. *Alexandria Engineering Journal*, 65, 661–673.
- Kaltakkıran, G., Akolaş, H. İ. ve Bakirci, K. (2023). Evaluation of energy-exergy performance and sustainability index of a DI engine integrated with designed electromechanical EGR cooling system. *Energy Conversion and Management*, 290, 117229.
- Kaltakkıran, G. ve Ceviz, M. A. (2021). The performance improvement of direct injection engines in cold start conditions integrating with phase change material: Energy and exergy analysis. *Journal of Energy Storage*. doi:10.1016/j.est.2021.102895
- Lajqi, N. B., Baxhaku, B. I. ve Lajqi, S. B. (2009). Effect of Intercooler on Turbocharged Diesel Engine Performance. *13th International Research/Expert Conference* içinde (ss. 437–440). Hammamet, Tunisia.
- Lazarev, E. A., Pomaz, A. N. ve Salov, A. Y. (2016). System of Ejection Cooling of the Charged Air and Evaluation of its Effectiveness in the Engine. *Procedia Engineering*, 150, 235–240.
- Liu, S. ve Zhang, Y. (2020). Research on the integrated intercooler intake system of turbocharged diesel engine. *International Journal of Automotive Technology*, 21, 339–349.
- Liu, Z., Sun, M., Huang, Y., Li, K. ve Wang, C. (2020). Investigation of heat transfer characteristics of high-altitude intercooler for piston aero-engine based on multi-scale coupling method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156, 119898.
- Mifdal, M. Y. A., Nuraida, M. H., Norzalina, O. ve Shamil, A. H. (2015). Turbo Intercooler Cooling System. *International Journal of Engineering Science Invention*, 4(1), 49–56.
- Muqem, M. (2012). Turbocharging with air conditioner assisted intercooler. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2(3), 38–44.
- Pan, W., Yao, C., Han, G., Wei, H. ve Wang, Q. (2015). The impact of intake air temperature on performance and exhaust emissions of a diesel methanol dual fuel engine. *Fuel*, 162, 101–110.
- Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*.
- Ranjan, R., Brahmasani, L. ve Khan, P. (2016). *Development of an efficient power train cooling system with effective utilization of front end opening for a utility vehicle*. SAE Technical Paper.
- Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H. E. ve Soruşbay, C. (2013). *İçten yanmalı motorlar*. Birsen Yayınevi.
- Shah, S. R., Maiboom, A., Tauzia, X. ve Hétet, J.-F. (2009). Experimental study of inlet manifold water injection on a common rail HSDI automobile diesel engine,

- compared to EGR with respect to PM and NO_x emissions and specific consumption. *SAE technical paper*, (01–1439).
- Tan, P. ve Lu, J. (2003). *Modeling Particulate Matter Emission from Diesel Engines*. SAE Technical Paper.
- Tang, X., Shi, Q., Li, Z., Xu, S. ve Li, M. (2022). Research on the influence of the guide vane on the performances of intercooler based on the end-to-end predication model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 192, 122903.
- Toporcer, E., Tučnik, P. ve Cisek, J. (2010). Intercooler for extremely low temperatures of charging. *Journal of KONES*, 17, 529–536.
- Torregrosa, A. J., Olmeda, P., Martin, J. ve Degraeuwe, B. (2006). Experiments on the influence of inlet charge and coolant temperature on performance and emissions of a DI Diesel engine. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30(7), 633–641.
- Yardımcı, M. H. (2008). *Motor teknolojisi*. Nobel Yayın Dağıtım.
- Zhang, Q., Qin, S. ve Ma, R. (2016). Simulation and experimental investigation of the wavy fin-and-tube intercooler. *Case Studies in Thermal Engineering*, 8, 32–40.
- Zhao, X., Tokarev, M., Adi Hartono, E., Chernoray, V. ve Grönstedt, T. (2017). Experimental validation of the aerodynamic characteristics of an aero-engine intercooler. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(5).

Bölüm 17

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN BİNALARDA KULLANIMI ÜZERİNE TÜRKİYE'DE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Fatih Selim BAYRAKTAR¹

Ramazan KÖSE²

1 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü

2 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü



GİRİŞ

Sürdürülebilirlik, gelecek kuşakların ihtiyaçlarının karşılanmasından taviz verilmeksizin günün ihtiyaçlarının karşılanması olarak tanımlanmaktadır (Our Common Future Report, 1987). Bu bağlamda gündeme gelen Çevre Dostu Binalar konsepti ile geleneksel binaların olumsuz özelliklerinin çevre ve insan üzerindeki etkilerinin azaltılması hedeflenmektedir. Başka bir deyişle bu binalar geleneksel yapılarak göre düşük az fosil tabanlı enerji ve su tüketen, çevresel etkileri daha az olan ve yüksek iç mekân kalitesine sahip binalardır.

Enerji verimliliği; yaşam standardı ve hizmet kalitesini düşürmeden enerji tüketiminin azaltılması olarak ifade edilmektedir. Binalarda enerji verimliliği gün geçtikçe önem kazanan bir kavramdır. Yıllar geçtikçe artan kişi başı elektrik tüketimi enerji talebini artırmaktadır. Enerji güvenliği ülkeler için bir milli güvenlik konusudur ve dışa bağımlı olmak istemeyen ülkeler için çözülmesi gereken ciddi bir sorundur. Bu sorunu çözmek için ülkeler yenilenebilir enerji kaynakları ile yerli yakıtlar üzerine yoğunlaşmakta ve enerji verimliliğine sahip cihazların tercih edilmesini teşvik etmektedir. Diğer bir seçenek ise enerji tasarrufu sağlamaktır.

Ülkemizde enerjinin yaklaşık %20'si, elektriğin ise %22'si konutlarda tüketilmektedir (ETKB, 2020). Bu sebeple binalarda sağlanacak enerji tasarrufu enerji talebinde ciddi düşüşler sağlayacaktır. Ayrıca binalarda kullanılan enerjinin %60'ı ısıtma/soğutma uygulamalarında tüketilmektedir (ETKB, 2018). Verimli sistemlerin kullanımı ve enerji tasarrufu uygulamaları ile bu enerji yükü azaltılma potansiyeline sahiptir.

Bu çalışmada faz değiştiren malzemeler kısaca tanıtılacak, ardından faz değiştiren malzeme katkılı bina uygulamalarının ele alındığı Türk araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen veya Türk araştırmacıların dahil olduğu yabancı araştırma gruplarının yaptığı makaleler ile tez çalışmaları aktarılacaktır. Çalışmada binalarda yapılan deneysel ve teorik çalışmalar üzerine yoğunlaşmıştır. Faz değiştiren malzemelerin hazırlanması ve termofiziksel özelliklerinin analizinin gerçekleştirildiği ama bir bina üzerine uygulanmayan çalışmalar bu araştırmaya dahil edilmemiştir.

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER

Faz değiştiren malzemeler (FDM'ler), belirli sıcaklık aralıklarında faz değişikliği gösteren ve bu süreçte enerji depolayabilen malzemelerdir. Faz değişimi, malzemenin katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçtiği bir dönüşümü ifade etmektedir. Bu dönüşüm sırasında FDM'ler, gizli ısı adı verilen büyük miktarda ısı enerjisi emer veya salarlar. . Gizli ısı depolama kapasitesi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır:

$$Q = \int_{T_1}^{T_m} mc_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_2} mc_p dT = m[c_{s,p}(T_m - T_1) + a_m \Delta h_m + c_{l,p}(T_2 - T_m)]$$

Faz değiştiren malzemeler, binalarda enerji verimliliği ve konfor sağlama konusunda önemli bir potansiyele sahiptir. Bu malzemeler, dış çevredeki sıcaklık değişimlerine tepki vererek faz değişimi prosesini gerçekleştirirler. Bu değişim, ısı emme veya salma gibi yöntemlerle binaların enerji tüketimini optimize etmeyi ve iç mekân sıcaklığını kontrol etmeyi mümkün kılmaktadır.

FDM'ler, binalarda enerji tüketimini azaltmak için çeşitli şekillerde kullanılabilir. Binaların duvar, tavan veya zemin kaplamalarında FDM içeren yapı bileşenlerinin kullanılmasıyla iç mekân sıcaklığı kontrol edilebilir. Gündüzleri güneş enerjisiyle ısınan ve faz değiştiren malzemeler, geceleyin bu enerjiyi serbest bırakarak iç mekân sıcaklığını düşürmeye yardımcı olmaktadır. Böylece, elektrik veya diğer enerji türleri ile çalışan iklimlendirme sistemlerine olan ihtiyaç azalmakta ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Faz değiştiren malzemeler aynı zamanda binalarda ısı depolama sistemlerinde de kullanılabilir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanması ve kullanımının optimize edilmesi amacıyla FDM tabanlı ısı depolama sistemleri geliştirilmektedir.

Faz değiştiren malzemelerin binalarda kullanımı, enerji verimliliğini artırırken konfor düzeyini de iyileştirebilir. FDM'ler, binaların iç mekân sıcaklığını daha istikrarlı bir şekilde tutabilmekte ve sıcaklık dalgalanmalarını azaltabilmektedir. Bu da kullanıcıların daha konforlu bir ortamda yaşamasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak, faz değiştiren malzemeler binalarda enerji verimliliğini artırmak, enerji tüketimini azaltmak ve konforu iyileştirmek için önemli bir potansiyele sahiptir.

TÜRK BİLİM İNSANLARININ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME KATKILI BİNALAR ÜZERİNE YAPTIĞI ÇALIŞMALAR

Faz değiştiren malzemelerin binalarda kullanımı üzerine yapılan çalışmalar üç ana başlıkta toplanmıştır. Birinci başlıkta Türk araştırma gruplarının yaptığı çalışmalar aktarılırken ikinci başlıkta diğer ülkelerden araştırma gruplarına katılan Türk bilim insanlarının çalışmaları anlatılmıştır. Üçüncü başlıkta ise Ülkemizde faz değiştiren malzemelerin binalarda kullanımı üzerine yapılan tez çalışmaları incelenmiştir.

Türk Araştırma Grupları Tarafından Gerçekleştirilen Çalışmalar

Sarı, Karaipekli ve Kaygusuz'un yaptıkları çalışmada (2008) kaprik ve miristik asit bazlı gizli ısı depolama sistemi tasarlanmıştır. Deney sonuçlarına göre bu materyallerden üretilen faz değiştiren malzeme katkı du-

var paneli ile iç ortam sıcaklığını 4°C daha düşürülerek binaların ısı konfor şartlarını artırmada kullanılabileceği ispatlanmıştır.

Konuklu ve Paksoy'un yaptığı çalışmada (2009) binalarda güneş enerjisi kazanımı için FDM'lerin sandviç panellere entegre edilmesi planlanmıştır. Sonuçlara göre yaz döneminde iç sıcaklık 2,5°C düşürülmüş ve soğutma yükü %7 azaltılmıştır. Kış aylarında ise 2,2°C daha yüksek iç sıcaklık sağlanırken ısıtma yükünde %17 azalma elde edilmiştir.

Çalışkan, Dinçer ve Hepbaşlı (2012) alttan ısıtma sistemlerine faz değiştiren malzemeyi entegre ederek deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. FDM katkılı enerji depolama sisteminin ısıtma yükünü azalttığı deney sonuçları ile anlaşılmıştır.

Kurnuç ve Kara yaptıkları çalışmada (2014) üç camlı pencere sistemi ile kaplanan faz değiştiren malzeme katkılı duvarın enerji özelliklerini Ekim-Mayıs döneminde incelemiştir. Sonuçlara göre FDM sayesinde ısı kazancı bu dönemde %7-57 arasında artarken yıllık bazda artış ortalama %16 olarak gerçekleşmiştir.

Sarı (2014) düşük sıcaklıklı ısı enerji depolaması için doğal kil-alçı karışımına polietilen glikol (PEG600) faz değiştiren malzemesini eklemiştir. Analiz sonuçları; hazırlanan faz değiştiren malzeme kompozitlerinin iyi bir ısıl güvenilirliğe, kimyasal ve ısıl kararlılığa sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca FDM katkılı duvar kaplamalarından oluşan hücre iç ortam sıcaklıklarının standart hücreye göre ortalama 60 dakikada $2,08 \pm 0,02^\circ\text{C}$ ve 120 dakikada $1,47 \pm 0,0^\circ\text{C}$ daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Aydın, Utlu ve Kıncaç'ın gerçekleştirdikleri çalışmada (2015) güneş enerjisi kaynaklı bir gizli ısı enerjisi depolama sisteminin ısıl performans analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde sistemin toplam verimi %70,4 olarak hesaplanırken toplam ekserji verimi ise sadece %2,5 olarak bulunmuştur. Ayrıca hesaplamalara göre giren enerjinin %74'ü ve giren ekserjinin %37'si depolanabilmiştir.

Konuklu ve arkadaşları (2015) binalarda mikrokapsüllenmiş FDM uygulamaları üzerine bir derleme makale yazmıştır. Mikrokapsülleme yöntemleri ve uygulamaları incelenmiş, parçacık boyutu bakımından da analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca binalarda hangi yapı malzemeleri ile kompozit oluşturulduğu okuyuculara aktarılmıştır.

Tokuç, Başaran ve Yesügey (2015) yaptıkları çalışmada İstanbul'da çatı katında yapı elemanlarına faz değiştiren malzeme kullanmış ve sistemin deneysel ve sayısal analizini gerçekleştirmiştir. İstanbul'da yaz koşullarında RT27 malzemesi verimli iken kış şartlarında dış ortam sıcaklığı çoğunlukla 25°C'nin altında olduğu için genellikle erime olmamıştır ve bu sebeple uygun seçilen FDM'lerin kış çalışma koşullarına uygun olmadığı anlaşılmıştır. Dört

mevsimde de başarılı bir FDM olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Kara (2016) faz değiştiren malzeme katkılı duvarların günlük performansını analiz etmiştir. Test odası, Ekim 2011'den Mayıs 2012'ye kadar olan ısıtma periyodu boyunca izlenmiş ve duvarların ısı performansını günlük deneysel olarak belirlenmiştir. FDM'li duvarların sağladığı güneş enerjisi kazancının test odasının günlük ısı yüküne oranı %12 ile %25 arasında değişmiştir.

Karaipekli ve Sarı (2016) binalarda ısı enerji depolama amacıyla organik FDM içeren kompozit bir harç geliştirmiş ve ısı performansını incelemiştir. Isıl performans testleri, üretilen FDM'li harçların iç sıcaklığı uzun süre konforlu aralıkta tutarak ısı konforu iyileştirebileceğini ve enerji tüketimini azaltabileceğini göstermiştir.

Özdenefe ve Dewsbury'nin yaptıkları çalışmada (2016) tipik bir Kıbrıs evinde Mayıs-Ekim döneminde faz değiştiren malzeme kullanımının ısı performansına etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre iç ortam sıcaklığı 1,7°C ve soğutma enerji yükü %14 azaltılmıştır.

Tokuç, Yesügey ve Başaran çalışmalarında (2017) Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde faz değiştiren malzeme katkılı bina kabuğuna sahip çatı katlarında ısı ve enerji analizi gerçekleştirmiştir. 4 farklı iklim çeşidinde de başarılı bir tek tip FDM olmadığı hesaplanmıştır. Ya birden fazla FDM kullanımı ya da farklı mevsimlerde erime sıcaklığı farklı olan FDM'lerin tercih edilmesi önerilmiştir. Geçiş mevsimlerinde FDM'ler en iyi performansı sunmuştur.

Sarı ve arkadaşları (2018) faz değiştiren malzeme katkılı çimentonun hazırlanması, karakterizasyonu ve ısı özelliklerini analiz etmiştir. Laboratuvar ölçeğinde ısı performansını karşılaştırmak için FDM'li/FDM'siz iki kübik test odası inşa edilmiştir. Isıtma süresi boyunca küplerin iç ortam sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı ortalama 0,78 °C olarak ölçülmüştür. Tüm sonuçlar, hazırlanan FDM'nin binalarda iklimlendirme amacı için uygun bir bileşik olarak kabul edilebileceğini göstermiştir.

Oruç, Dinçer ve Javani'nin yaptıkları çalışmada (2019) toprak kaynaklı bir ısı pompasına FDM katkılı radyant ısıtıcı duvar uygulaması eklenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. FDM katkısının enerji verimliliğini %62'den %87'ye, ekserji verimliliğini ise %14'ten %56'ya çıkardığı hesaplanmıştır.

Arıcı vd. (2020) maksimum gizli ısı aktivasyonu için FDM katkılı dış duvar tasarımı gerçekleştirmiştir. FDM'nin konumu, füzyon sıcaklığı ve katman kalınlığının enerji tasarrufu, azalma faktörü ve zaman gecikmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Türkiye'nin üç ili için hem ısıtma hem de soğutma yükleri dikkate alınarak gizli ısıyı maksimum düzeyde kullanan yıllık optimize edilmiş FDM füzyon sıcaklığı ve katman kalınlığı belirlenmiştir. Hesaplanan sonuçlar, aylık optimize edilmiş FDM erime sıcaklığının ve FDM

katman kalınlığının iklim koşullarına bağlı olarak 6 ila 34 °C, 1 ila 20 mm arasında değiştiğini göstermektedir.

Cellat vd.'nin yaptığı çalışmada (2020) faz değiştiren malzeme katkılı pasif güneş enerjisi depolama sistemine sahip test kabinlerinden 2 yıl boyunca elde edilen veriler analiz edilmiştir. FDM katkısının %13 civarında enerji tasarrufu sağladığı hesaplanmıştır.

Murathan ve Manioğlu'nun yaptığı çalışmada (2020) sıcak-kuru iklim bölgelerinde bina yapı bileşenlerinde enerjinin korunması için FDM kullanımını araştırmıştır. 21 Ocak-21 Temmuz döneminde iç duvarlar ve zemine uygulana FDM enerji yükünde %9.69 azalma sağlamıştır.

Pırasacı (2020) yaptığı çalışmada ısıtma sezonunda bir konut apartmanının dış duvarına FDM katmanı entegre ederek bina özellikleri, bina sakinlerinin davranışları ve dış ortam koşullarını içeren sayısal bir analiz gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre FDM katman entegrasyonu ile kışın ısıtmada kullanılan enerji ihtiyacı azaltılsa da faz değişiminin olmadığı durumlarda FDM kullanımının mantıksız olması nedeniyle FDM katman entegrasyonunun uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Sarı vd.'nin yaptığı çalışmada (2020) düşük maliyetli ve odun lifi bazlı faz değiştiren malzeme katkılı kompozit malzeme geliştirilmiş ve ısı enerjisi depolama özellikleri araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre FDM katkılı test hücresinde referans hücreye göre ısıtma döneminde 2.67°C ve soğutma döneminde 1.18°C sıcaklık farkı sağlanmıştır.

Tunçbilek vd. (2020a) bir soğutma operasyonunda FDM içeren bir ofis duvarının ısı performansının analizini gerçekleştirmiştir. Konum, FDM katman kalınlığı ve faz geçiş sıcaklığı gibi tasarım parametreleri, gizli ısının verimli kullanımıyla enerji tasarrufunu en üst düzeye çıkarmak için optimize edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre yazarlar FDM katmanını iç kısma yakın bir yere yerleştirilmesini önermektedir. Optimum faz sıcaklığında, oda ve duvar yüzey sıcaklığı çalışma saatleri öncesinde ve öğle yemeği molalarında düşürülerek klimanın çalışma döngü sayısı azaltılmıştır. Ayrıca 23 mm FDM katman kalınlığına sahip duvar, FDM'siz duvara göre %12,8'e varan enerji tasarrufu sağlamıştır.

Tunçbilek ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada (2020b) Marmara Bölgesi'nin iklim koşullarında FDM katkılı tuğlanın mevsimsel ve yıllık performansı analiz edilmiştir. Sonuçlara göre yıllık enerji tüketimi %17.6 azaltılmıştır.

Gencel ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri çalışmada (2021) taban küllüne faz değiştiren malzeme ekleyerek enerji etkin yeni bir harç malzemesi tasarlamış ve ısı enerjisi depolama özellikleri incelenmiştir. FDM uygulanan yapının referans binaya göre ısı farkı ısıtma döneminde 2.8°C ve soğutma döneminde 1.95°C olarak ölçülmüştür.

Hekimoğlu ve arkadaşları (2021a) FDM katkılı bir çimento kompoziti geliştirmiş, ısı enerji depolama ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Sonuçlara göre bu kompozit kullanıldığında iç ortam sıcaklığında maksimum değişim ısıtma sürecinde 2.48°C ve soğutma sürecinde 1.71°C olarak hesaplanmış ve binalarda enerji tüketiminin azaltılmasına katkıda bulunacağı kanıtlanmıştır.

Hekimoğlu vd.'nin yaptığı çalışmada (2021b) faz değiştiren malzeme katkılı çimento kompoziti üretilmiş ve ısı özellikleri deneysel olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde FDM kullanılan test hücresinin iç ortam sıcaklığı referans test hücresine göre ısıtma ve soğutma dönemlerinde sırasıyla 1.9°C ve 1.39°C farklı ölçülmüştür. Bu sebeple yeni kompozitin binalarda enerji korunumu ve ısı düzenleme konularında başarılı olduğu belirtilmiştir.

Arıcı vd. (2022) bina dış duvarlarına çift katmanlı FDM ekleyerek enerji tasarrufu potansiyelini analiz etmiştir. 7 farklı senaryonun incelendiği çalışmada elde edilen en yüksek verim %17.2 olarak hesaplanmıştır.

Çalışkan vd.'nin yaptığı çalışmada (2022) faz değiştiren malzemelerin binaların ısıtma uygulamalarında kullanımı konusunda ısı analiz ve değerlendirme gerçekleştirmiştir. FDM uygulanması sonucunda ısı taşıyıcı akışkanın sıcaklığının artması ile ekonomilerin verimliliği %51'e yükselmiştir. Ayrıca FDM katkılı ısı değiştiricinin maksimum verimliliği %13 olarak hesaplanmıştır.

Gencil vd. (2022a) binalarda ısı yönetimi uygulamalarına yönelik olarak FDM katkılı beton kompoziti geliştirmiş ve özelliklerini incelemiştir. Kompozitin uygulandığı odada ısıtma sürecinde 2.8°C daha düşük, soğutma sürecinde ise 1.29°C daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca 14.28 kWh/gün 'lük enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Gencil ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2022b) FDM katkılı yeni bir bina ısı enerji depolama malzemesi tasarlanmıştır. Bu malzemenin kullanıldığı odada gündüz vaktinde 7 saat boyunca referans odaya göre 3°C daha düşük sıcaklık elde edilerek ısı konfor şartları için olumlu katkıda bulunduğu ispatlanmıştır. Ayrıca ısıtma sürecinde 0.3°C daha yüksek sıcaklığa ulaşılarak kış aylarında da verim elde edilmiştir.

Gencil ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada (2022c) binaların pasif ısı enerji yönetimi uygulamalarında kullanmak üzere bir faz değiştiren malzeme geliştirmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde 5.56 kWh enerji tasarrufu sağlandığı hesaplanmıştır.

Hekimoğlu ve Sarı (2022) yaptıkları çalışmada ısı enerji uygulamalarında faz değiştiren malzeme (FDM) kullanımı üzerine bir derleme makale yazmıştır. Bu çalışmada ısı enerjisi pasif olarak depolayan FDM'ler hakkında bilgiler sunulmuştur. FDM çeşitleri, seçim kriterleri, artı ve eksileri ile kullanım alanları aktarılmıştır.

Tunçbilek vd. (2022) nano-FDM katkılı bina kabuğunun enerji tüketimi ve ısı performans üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuçlar analiz edildiğinde duvarlara saf FDM eklendiğinde yıllık enerji tasarrufu %20.7 olmaktadır.

Uludaş ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2022) Akdeniz ikliminde faz değiştiren malzeme katkılı bir evin enerji verimliliği incelenmiştir. Sonuçlara göre 27°C erime sıcaklığına sahip FDM kullanıldığında yıllık enerji tüketimi yaklaşık %20 azalmaktadır. Ayrıca FDM eklenmesi ile yaz aylarında yaşanan aşırı ısınma olaylarının olumsuz etkileri azaltılabilmektedir.

Yaraş ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2022) alçı duvar levhasına FDM eklenmiş; özellikleri, enerji tasarrufu ve karbon emisyonundaki azalma potansiyelleri incelenmiştir. Soğuk havada FDM içeren odanın iç ortam sıcaklığının 1.2-2.66°C arasında değişen değerlerde daha yüksek olarak hesaplanmıştır.

Yabancı Araştırma Gruplarına Dahil Olan Türk Bilim İnsanlarınca Yapılan Çalışmalar

Alper Aydın'ın katıldığı Bottarelli'nin çalışmasında (2015) faz değiştiren malzeme destekli yeni bir toprak kaynaklı ısı pompasının (TKIP) sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Yıllık performans, Kuzey İtalya'da bulunduğu varsayılan bir konut binası için tahmini enerji gereksinimi dikkate alınarak simüle edilmiştir. Saatlik zaman serisi sınır koşullarına ve yıllık performansa göre simülasyon sonuçları, FDM'lerin kullanılmasının zemindeki ısı dalgayı yumuşatabildiğini, ısı pompasının performans katsayısını (COP) iyileştirebildiğini göstermektedir.

Halime Paksoy'un katıldığı Stritih ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2018) sıfır enerjili bina tasarımı için pasif FDM teknolojisi entegrasyonu araştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde FDM katkılı duvarların sıfır enerjili bina konseptine katkı sağladığı ve binanın enerji tüketimini azalttığı gözlenmiştir.

Müslüm Arıcı'nın katıldığı Li'nin makalesinde (2018a) farklı mevsimlerde nano-FDM içeren pencerelerin enerji analizi yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde daha yüksek nanoparçacık hacim oranı daha yüksek enerji tüketimine yol açarken ve daha büyük parçacık çapı, daha küçük enerji tüketimi sağladığı gözlenmiştir. Minimum enerji tüketimi, tüm mevsimler için %1'lik nanoparçacık konsantrasyonu ve 100 nm'lik nanoparçacık çapı ile elde edilmektedir. Çalışılan parametrelerin etkisinin büyüklüğü kışın daha belirgindir. Enerji tüketimi, uygun bir nanoparçacık hacim fraksiyonu ve nanoparçacık boyutunun seçilmesiyle %4'e kadar azaltılabilmektedir. Pencerelerin iç yüzeyi ile iç ortam arasındaki sıcaklık farkı esas olarak yazın 1-4 °C, sonbaharda 5-10 °C ve kışın 14-16 °C aralığında gerçekleşmektedir.

Müslüm Arıcı'nın katıldığı başka bir Li çalışmasında (2018b) nanoparçacıkla güçlendirilmiş FDM ile doldurulmuş pencerenin ısı ve optik perfor-

mansı sayısal olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, nanoparçacık dağılmış parafin mumu ile doldurulmuş pencere birimlerinin optik ve ısıl performanslarının, saf parafine kıyasla iyileştirildiğini göstermiştir. Pencere ünitelerinin hem ısıl hem de optik performansları göz önüne alındığında, FDM'de hacim oranı %1'in altında ve nanoparçacık boyutu 15 nm'nin altında olan CuO nanoparçacıklarının kullanılması önerilmektedir.

Müslüm Arıcı'nın katılım gösterdiği Li'nin yaptığı çalışmada (2018c) faz değiştiren malzeme katkılı camlı tavanın iç ortam ısıl konforunu ve enerji tüketimini analiz etmiştir. Sonuçlar, FDM ile doldurulmuş cam çatının enerji tüketiminin havanınkinden önemli ölçüde daha az olduğunu ve %47,5'e varan enerji tasarrufu sağlanabileceğini göstermektedir. Geri ödeme süresi, FDM erime sıcaklığının doğru seçilmesiyle 3,3 yıla düşürülebilmektedir. FDM'nin erime sıcaklığının artırılması, camlı tavanın iç yüzeyinin sıcaklığını etkili bir şekilde azaltabilmektedir, ancak iç mekân ısıl konfor ortamının memnuniyetsizlik oranı üzerinde hafif bir etkiye sahiptir. FDM tabakasının kalınlığının artırılması, camlı tavan ve iç odanın iç yüzeyinin tepe sıcaklığını, enerji tüketimini ve memnuniyetsizlik oranını azaltmaktadır. En yüksek enerji tüketimi ve memnuniyetsizlik oranı 20° eğim açısında elde edilmiştir.

Müslüm Arıcı'nın katıldığı Liu ve arkadaşlarının makalesinde (2019) faz değiştiren malzeme ile doldurulmuş havalandırma yapılmayan çok katmanlı cam yüzeyin ısıl performansı analiz edilmiştir. Sayısal sonuçlar, FDM kalınlığının artmasıyla zaman gecikmesinin artmakta ve bu durumun bir sonucu olarak ısıl konfor artmaktadır. Ayrıca FDM kalınlığının artması ile iç yüzey sıcaklığı oda sıcaklığına, yani iç ortam sıcaklığına yaklaşmaktadır. FDM kalınlığının artmasının bir başka olumlu sonucu ise ısı kaybını azaltmasıdır. Çok katmanlı cam yüzeyden ısı kaybının, 20 mm'den daha küçük bir kalınlıkta bile FDM kullanılarak önemli ölçüde azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

Müslüm Arıcı'nın katılım sağladığı Li'nin çalışmasında (2020) binalarda FDM içeren pencere sistemlerinin ısıl ve optik performansları derleme makale olarak literatüre sunulmuştur. Mevcut çalışma, FDM içeren cam ünitelerinin optik ve ısıl performansına ilişkin deneysel ve simülasyon araştırmalarını gözden geçirmekte ve kullanılan araştırma yöntemlerini, matematiksel modelleri ve çıkarılan önemli sonuçları tartışmaktadır. Araştırmanın sonucuna göre FDM içeren pencere, ısıl enerji depolamak için güneş radyasyonunun bir kısmını emebilirken, görünür radyasyonun günışığı aydınlatması için iç ortama girmesine izin verebilmektedir, bu da sıcaklık dalgalanmalarının azalmasına ve iç mekân sakinlerinin ısıl konforunun artmasını sağlamaktadır.

Müslüm Arıcı'nın katıldığı bir başka çalışmada Zhang vd. (2020) çift cam arasına yerleştirilen çeşitli nanoparçacık içeren faz değiştiren malzemelerin mevsimsel ısıl performansını araştırmıştır. TiO₂ içeren FDM yaz mevsiminde

kullanıldığında iç ortam sıcaklığını 0.82 K düşürürken; ZnO içeren FDM geçiş mevsimi ve kış aylarında kullanıldığında iç ortam sıcaklığını sırasıyla 0.84 K ve 0.89 K artırmaktadır.

Ahmet Sarı'nın katıldığı Tyagi ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada (2021) FDM katkılı gelişmiş güneş enerjisi depolama sistemlerinin binalarda ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılması üzerine geniş bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Pik enerji kullanımı düşürmek için güneş enerjisi depolama sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerine dikkat edildiği süreçte ekonomik açıdan olumlu etkisi kesin olarak belirtilmiştir.

Ekrem Tunçbilek ve Müslüm Arıcı'nın Wonorahardjo vd. ile yaptığı çalışmada (2021) tropik iklimde kentsel konutlar için FDM katkılı pasif iklimlendirme sistemlerini deneysel olarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, odada ısı depolama paneli kullanılmasının pik sıcaklıkları azalttığını ve ısı konfor ortamını iyileştirdiğini göstermiştir. Hindistan cevizi yağı katkılı FDM, referans duruma göre iç ortamda 0,5°C daha düşük tepe sıcaklık sağlarken, üst bölgede daha fazla sıcaklık düşüşü gözlemlenmiştir. Ayrıca FDM içeren panel, gün boyunca gözlemlenen sıcaklık dalgalanmalarını önemli ölçüde azaltmıştır.

Hakan F. Öztop'un katılım sağladığı Abu-Hamdeh'in araştırmasında (2021) binalarda FDM uygulamasının enerji tasarrufu üzerindeki ve kışın klima santrali ünitelerinin elektrik tüketimindeki etkisini incelemiştir. En iyi koşullarda Aralık, Ocak ve Şubat aylarında sırasıyla %11,25, %11,23 ve %10,35 enerji tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca termodinamik hesaplamalar, FDM yüklemesi nedeniyle klima santrali elektrik kullanımındaki maksimum azalmanın %11,73 olduğunu göstermiştir. Geri ödeme süresi tekniği kullanılarak ekonomik analiz yapılmış ve en iyi koşullarda geri ödeme süresinin 18,6 yıl olduğu bulunmuştur.

Müslüm Arıcı ve Çağatay Yıldız'ın katıldığı Li'nin çalışmasında (2021a) Kuzeydoğu Çin'de kırsal bir konutun duvarlarına faz değiştiren malzeme ekleyerek termoeconomik analiz gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan sonuçlar, FDM'nin duvarın içindeki iç yüzeye yakın konumlandırılmasının ısıtma süresi boyunca %12,9 enerji tasarrufu sağladığını, yanlış yapılandırmanın ise enerji tüketimini artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca, 18°C'ye ayarlanan iç ortam sıcaklığı için $T_m=16^\circ\text{C}$ olan FDM en yüksek enerji tasarrufu sağlarken, $T_m=26^\circ\text{C}$ olan FDM en düşük geri ödeme süresine (1,8 yıl) sahiptir. En uygun FDM duvar kullanılarak kullanım ömrü boyunca karbon salınımı 52,7 kg/m² azaltılmaktadır.

Müslüm Arıcı ve Çağatay Yıldız'ın katılım gösterdiği Li vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada (2021b) Çin'in soğuk iklim bölgelerinde bulunan kırsal konutlarda enerji tasarrufu sağlamak için binanın bir yüzeyine kapalı veranda tasarlanmış ve verandanın ön yüzeyine ise FDM entegreli panjur ta-

sarımı geliştirilmiştir. Ekim-Nisan ayları arasında deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre kapalı veranda sistemi aylık ortalama 439 kWh ve 7 ayın toplamında 1992 kWh enerji tasarrufu sağlanmıştır. 18°C'de yıllık enerji tasarrufu %22.73 olarak hesaplanmıştır. FDM katkılı panjur sisteme ek olarak %5.27 enerji tasarrufu sağlamıştır.

Müslüm Arıcı ve Çağatay Yıldız'ın katılım gösterdiği Zhang'ın çalışmasında (2021) Çin'in şiddetli soğuk ikliminde on farklı cam konfigürasyonu ile aerjel doldurulmuş çok camlı pencere sistemlerinde FDM optimizasyonu ve enerji verimliliği araştırılmıştır. Sonuçlar, cam pencereye FDM eklenmesinin, kışın cam pencerelerin ısı performansının düşmesine neden olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, silika aerjel, üç camlı pencerelerde uygun bir erime sıcaklığına sahip bir FDM ile birlikte kullanıldığında ısı konfor ortamını iyileştirilebilmektedir.

Ali Temiz, Gökhan Hekimoğlu, Gaye Köse Demirel ve Ahmet Sarı'nın katıldığı Amini yönetiminde gerçekleştirilen çalışmada (2022) çam odununa bir faz değiştiren malzeme olan kaprik asit eklenerek binalarda enerji tasarrufu malzemesi olarak kullanımı tasarlanmıştır. Deney sonuçlarına göre iç ortam sıcaklığında ısıtma sürecinde 4.04°C azalma gözlenirken soğutma sürecinde ise 2.83°C artış hesaplanmıştır.

Ekrem Tunçbilek'in katılım gösterdiği Li vd.'nin yaptığı çalışmada (2022) pencere sisteminde faz değiştiren malzeme uygulamaları analiz edilmiştir. Çift cam uygulamalarında FDM kullanımı ile ısı kazancında %60 azalma, soğutma yüklerinde ise %66 azalma gözlenmiştir.

Hikmet Ş. Aybar'ın Hai ve arkadaşları ile yaptığı çalışmada (2022a) enerji tüketimini azaltmak için FDM katkılı ısı geri kazanım sistemleri ve FDM sistemlerinin binalardaki faydaları üzerine ısı bir analiz gerçekleştirmiştir. Pure Temp 23, Pure Temp 25, Pure Temp 27 ve Pure Temp 29 FDM'leri iki senaryo altında binaya entegre edilmiştir. Birinci senaryoda bina içi sıcaklık 23, 24 ve 25°C'de sabit tutulmuştur. 29°C'de faz değişimine uğrayan Pure Temp 29 binaya eklendiğinde bina 23°C'de 17,39 kWh/m², 24°C'de 17 kWh/m² ve 25°C ayar noktasında 16,92 kWh/m² daha az enerji tüketmiştir. Bir sonraki senaryo için (iç sıcaklık 23 ile 25°C arasında değişmekte), Pure Temp 29, 15,52 kWh/m²lik enerji tasarrufu kaydederek en iyi sonucu vermiştir.

Hikmet Aybar hocanın katılım gösterdiği Hai vd.'nin çalışmasında (2022b) yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak FDM için uygun konumun bulunması ve binanın ısı özelliklerinin güçlendirilmesi amaçlanmıştır. En uygun konumda FDM duvarlarda yıllık 14.9 kWh/m², çatıda 19.6 kWh/m² ve bütün olarak binada ise 15.9 kWh/m² enerji tasarrufu sağlamıştır.

Hikmet Aybar'ın katıldığı Hai ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2022c) FDM katkılı solar sistem tasarımı ile binanın ısı enerji kullanımının

düşürülmesi hedeflenmiştir. Nisan-Eylül sürecinde enerji tüketiminin %16.3 düşmesi sağlanmıştır.

Müslüm Arıcı hocanın katıldığı Shaik ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2022) FDM katkılı kil tuğlaların tasarımı gerçekleştirilmiş ve iklimlendirme cihazlarının enerji sarfiyatını azaltmak hedeflenmiştir. 6 farklı senaryoda deneyler yapıldıktan sonra binanın dış yüzeyine yerleştirilen FDM ile yıllık enerji tasarrufu sıcak-kuru iklimde 2079\$ olarak gerçekleşirken geçiş iklimlerinde bu değer 2095\$a çıkmaktadır. Ayrıca geri ödeme süreleri sıcak-kuru iklimde 11.29 yıl, kompozit iklimde ise 11.21 olarak hesaplanmıştır.

Binalarda Faz Değiştiren Malzeme Kullanımı Konusunda Yapılan Tezler

Bilgin (2017) 12 farklı FDM'nin farklı iklim bölgelerinde bulunan binalarda enerji tasarrufuna katkısını sayısal olarak incelemiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde FDM kullanımının ısı konforu artırdığı gözlenmiştir.

Depe (2017) Diyarbakır ve Erzurum şehirleri özelinde faz değiştiren malzemelerin binalarda kullanımına yönelik yenilikçi bir ısı depolama sistemi geliştirmiştir. Diyarbakır'ın sıcak-kuru iklim şartları ve Erzurum'un soğuk iklim özellikleri etkisinde FDM'lerin verimliliği incelenmiştir. Sonuçlara göre uygun FDM kalınlığı sağlandığında FDM'ler binalarda enerji verimliliği konusunda olumlu çıktılar vermektedir.

Köse (2019) binalarda enerji korunumu amacıyla yapı bileşenlerinde faz değiştiren malzeme kullanarak İstanbul ve Diyarbakır illerinde bir performans analizi gerçekleştirmiştir. Sonuçlar incelendiğinde FDM uygulaması İstanbul'da ısıtma harcamalarını azaltırken soğutma harcamalarını artırmıştır. Diyarbakır'da ise hem ısıtma hem de soğutma harcamaları azaltılmıştır.

Akyol (2021) faz değiştiren malzeme destekli pasif soğutma gerçekleştirmiştir. Parafin doldurulmuş plakalar hava kanalına belirli aralıklarla yerleştirilmiş ve giriş-çıkış sıcaklıkları ve hava hızları ile sistemin performansı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre levhalar arasındaki mesafe arttıkça depolanan enerji miktarı artmaktadır.

Anayurt (2021) faz değiştiren malzemeleri duvar ve çatı elemanlarında kullanarak 5 farklı iklim özelliğine sahip şehir için ısı performans analizi gerçekleştirmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tüm bölgeler için 21°C erime sıcaklığı ve 7 cm kalınlığa sahip FDM kullanıldığında en uygun değerlere ulaşılmaktadır. İstanbul, Ankara, İzmir ve Van illerinde FDM tabakasının gövdenin dış tarafında; Erzurum'da ise gövdenin iç tarafında kullanılması tavsiye edilmektedir.

Bayram (2021) yaptığı çalışmada pamuk lifli sıvaya kütlece %25 mikrokapsüllenmiş ve mikrokapsülsüz faz değiştiren malzeme ekleyerek deneysel

bir inceleme gerçekleştirmiştir. İki eşdeğer test odasında yapılan analizde ısıtma yükünün azaltılması hedeflenmiştir. Sonuçlara göre, mikrokapsülsüz FDM'nin enerji tasarrufuna mikrokapsüllü FDM'den daha fazla katkı sağladığı hesaplanmıştır.

Özdemir (2021) yaptığı çalışmada faz değiştiren malzemelerin bina duvarlarına uygulandığında ısıtma ve soğutma yüküne katkısını araştırmıştır. Sonuçlar incelendiğinde FDM kullanımı ile yaz aylarına soğutma yüküne %5,84; kış aylarında ise ısıtma yüküne %4,5 katkı sağlandığı hesaplanmıştır.

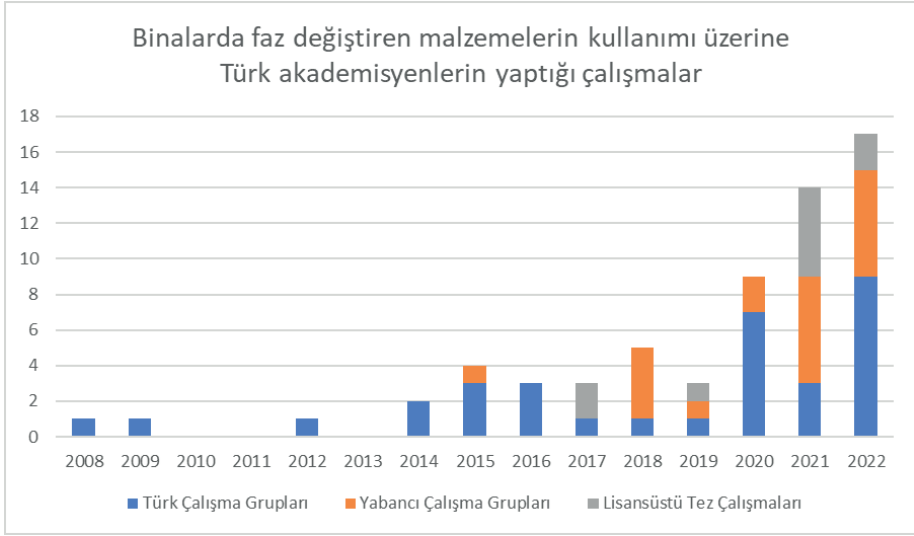
Canım (2022) yaptığı çalışmada bir FDM'yi pomza bloka eklemiş ve Ülkemizin farklı iklim bölgelerinde kullanıma uygun yeni nesil bir bina kabuğu bileşeni üretmeyi amaçlamıştır. %5, 10 ve 15 oranlarında FDM pomza agregasına eklenerek FDM'li pomza üretilmiş ve çalışmada FDM'li ve FDM'siz pomza bloklarının ısı özellikleri incelenmiştir. FDM kullanımı sonucu bina kabuğunun ısıl kütlesi artmış, iç mekân sıcaklık dalgalanmaları azalmış ve binanın özellikle soğutma yükünde iyileşme sağlanmıştır.

Haydaraslan (2022) faz değiştiren malzemelerin duvar bloklarındaki konumlandırılmasını 4 farklı ilde (İstanbul, Ankara, Antalya ve Erzurum) iklim koşulları göz önüne alınarak belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Sıcak ve ılık iklimlerde faz değiştiren malzemenin duvar bloğunun ortasına, soğuk iklimlerde ise iç yüzeye yakın yerleştirilmesinin daha iyi performans vereceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuçlar ve Öneriler

Binalarda faz değiştiren malzemelerin kullanımı ve bu sistemlerin ampirik ve teorik analizi üzerine Türk akademisyenlerin yaptığı çalışmaların incelenmesi sonucu literatürde Türk araştırma grupları 31 makale yayımlamış, Türk akademisyenlerin katkı yaptığı yabancı araştırma grupları 22 çalışma gerçekleştirmiştir. Ayrıca 8 adet doktora tezi ve 1 adet yüksek lisans tezinde de bu konuyu temel alan çalışmalar yapılmıştır.

Çalışmaların yayım tarihleri incelendiğinde 62 çalışmanın 40 tanesi son 3 yılda gerçekleştirilmiştir. Bu da çalışmaların yaklaşık %65'inin güncel çalışmalar olduğunu göstermektedir.



şekil 1: *Binalarda faz değiştiren malzemelerin kullanımı üzerine Türk akademisyenlerin yaptığı alışmalar.*

Binalarda faz değiştiren malzemelerin kullanımı üzerine alışmalar Web of Science dizininde incelendiğinde bu çalışmaların yaklaşık %3'ünün Ülkemiz kaynaklı olduğu gözlenmektedir. Bu konuda çalışan ülkeler bazında 14. sırada yer almaktayız. İsimler bazında baktığımızda ise Prof. Dr. Ahmet Sarı 3. sırada, Prof. Dr. Müslüm Arıcı 24. sırada ve Arş. Gör. Dr. Gökhan Hekimoğlu 25. sıradadır.

Faz değiştiren malzemelerin binalarda kullanımı üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmalarda son yıllarda dikkat çeken artış Ülkemiz adına umut vaat etmektedir. Konunun uzmanı hocaların yetiştireceği akademisyenler ile Türkiye'nin önümüzdeki 5 yıl içinde ilk 8'de yer alması, uzun vadede ise Çin ve ABD'nin bulunduğu sıralamaları zorlaması hedefi, gerçekleşmesi muhtemel bir senaryodur.

KAYNAKÇA

- Abu-Hamdeh, N. H., Melaibari, A. A., Alquthami, T. S., Khoshaim, A., Oztop, H. F., & Karimipour, A. (2021). Efficacy of incorporating PCM into the building envelope on the energy saving and AHU power usage in winter. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43.
- Akyol, E. (2021). *Faz Değiştiren Malzemeyle Pasif Soğutmanın İncelenmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Amini, M. H. M., Temiz, A., Hekimoğlu, G., Demirel, G. K. & Sari, A. (2022). Properties of Scots pine wood impregnated with capric acid for potential energy saving building material. *Holzforschung*, 76(8), 744-753.
- Anayurt, M. (2021). *Duvar Ve Çatı Elemanlarında Faz Değiştiren Malzeme Kullanımına Dayalı Isıl Performansın Farklı İklim Koşullarına Bağlı Olarak Değerlendirilmesi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Arıcı, M., Bilgin, F., Nižetić, S., & Karabay, H. (2020). PCM integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat. *Applied Thermal Engineering*, 165.
- Arıcı, M., Bilgin, F., Krajčik, M., Nižetić, S., & Karabay, H. (2022). Energy saving and CO2 reduction potential of external building walls containing two layers of phase change material. *Energy*, 252, 124010.
- Aydın, D., Utlu, Z., & Kincay, O. (2015). Thermal performance analysis of a solar energy sourced latent heat storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1213-1225.
- Bayram, N. S. (2021). *Faz Değiştiren Malzeme Destekli İç Sıva Uygulamalarının DeneySEL İncelenmesi: Pamuk Lifli Sıva Örneği* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Bilgin, F. (2017). *Faz Değiştiren Malzemelerin Farklı İklim Bölgelerinde Bulunan Binalardaki Enerji Tasarrufu Üzerindeki Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- United Nations, World Commission on Environment and Development (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future* (Report No.: A/42/427). Erişim Adresi: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- Bottarelli, M., Bortoloni, M., Su, Y., Yousif, C., Aydın, A. A., & Georgiev, A. (2015). Numerical analysis of a novel ground heat exchanger coupled with phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 88, 369-375.
- Canım, D. S. (2022). *Türkiye İklim Bölgelerinde Kullanıma Uygun Yeni Nesil Hafif Bina Kabuğu Bileşeni Önerisi: Faz Değiştiren Malzeme Katkılı Pompa Blok* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

- Cellat, K., Beyhan, B., Konuklu, Y., Dündar, C., Karahan, O., Güngör, C. & Paksoy, H. (2020). 2 years of monitoring results from passive solar energy storage in test cabins with phase change materials. *Solar Energy*, 200, 29-36.
- Çalışkan, H., Dinçer, I., & Hepbaşlı, A. (2012). Thermodynamic analyses and assessments of various thermal energy storage systems for buildings. *Energy Conversion and Management*, 62, 109-122.
- Çalışkan, H., Gürbüz, H., Şöhret, Y. & Ateş, D. (2022). Thermal analysis and assessment of phase change material utilization for heating applications in buildings: A modelling. *Journal of Energy Storage*, 50, 104953.
- Depe, D. (2017). *Yenilikçi Isı Depolama Sistemi Faz Değiştiren Malzemelerin Bina Enerjisi Verimliliği Üzerindeki Etkisinin Analizine Yönelik Yaklaşım : Diyarbakır Ve Erzurum Örnekleri* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı (2020). *Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2019 Yılı Gelişim Raporu* (Rapor No.: 15/V02). Erişim Adresi: https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular/bc0bc5c0-dea2-4e3a-adae-f95f8f91b862_UEVEP%202019%20Gelişim%20Raporu%20Yönetici%20Özeti.pdf
- Gencel, O., Hekimoğlu, G., Sarı, A., Sütçü, M., Er, Y. & Ustaoglu, A. (2021). A novel energy-effective and carbon-emission reducing mortars with bottom ash and phase change material: Physico-mechanical and thermal energy storage characteristics. *Journal of Energy Storage*, 44(A), 103325.
- Gencel, O., Sarı, A., Kaplan, G., Ustaoglu, A., Hekimoğlu, G., Bayraktar, O. Y., & Ozbakkaloglu, T. (2022a). Properties of eco-friendly foam concrete containing PCM impregnated rice husk ash for thermal management of buildings. *Journal of Building Engineering*, 58, 104961.
- Gencel, O., Hekimoglu, G., Sarı, A., Ustaoglu, A., Subasi, S., Marasli, M., Erdogmus, E. & Memon, S. A. (2022b). Glass fiber reinforced gypsum composites with microencapsulated PCM as novel building thermal energy storage material. *Construction and Building Materials*, 340, 127788.
- Gencel, O., Harja, M., Sari, A., Hekimoglu, G., Ustaoglu, A., Sutcu, M., erdogmus, E., Kaplan, G. & Bayraktar, O. Y. (2022c) Development, characterization, and performance analysis of shape-stabilized phase change material included-geopolymer for passive thermal management of buildings. *International Journal of Energy Research*, 46(15), 21841-21855.
- Hai, T., Abidi, A., Wang, L., Ghaderi, M., Mahmoud, M. Z., Rawa, M. J. H., & Aybar, H. (2022a). Thermal analysis of building benefits from PCM and heat recovery-installing PCM to boost energy consumption reduction. *Journal of Building Engineering*, 58.
- Hai, T., Said, N. M., Zain, J. M., Sajadi, S. M., Mahmoud, M. Z., & Aybar, H. Ş. (2022b). ANN usefulness in building enhanced with PCM: Efficacy of PCM installation location. *Journal of Building Engineering*, 57, 104914.

- Hai, T., Abidi, A., Zain, J. M., Sajadi, S. M., Mahmoud, M. Z., & Aybar, H. Ş. (2022c). Assessment of using solar system enhanced with MWCNT in PCM-enhanced building to decrease thermal energy usage in ejector cooling system. *Journal of Building Engineering*, 55, 104697.
- Haydaraslan, E. (2022). *Faz Değiştiren Malzeme (FDM) İçeren Duvar Bloklarının İç-yapı Formlarının Türkiye'deki İklim Bölgeleri İçin Belirlenmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Hekimoğlu, G., Nas, M., Ouikhalfan, M., Sarı, A., Tyagi, V. V., Sharma, R. K., ... & Saleh, T. A. (2021a). Silica fume/capric acid-stearic acid PCM included-cementitious composite for thermal controlling of buildings: Thermal energy storage and mechanical properties. *Energy*, 219, 119588.
- Hekimoğlu, G., Nas, M., Ouikhalfan, M., Sarı, A., Kurbetci, Ş., Tyagi, V. V., Sharma, R. K. & Saleh, T. A. (2021b). Thermal management performance and mechanical properties of a novel cementitious composite containing fly ash/lauric acid-myristic acid as form-stable phase change material. *Construction and Building Materials*, 274, 122105.
- Hekimoğlu, G., & Sarı, A. (2022). A review on phase change materials (PCMs) for thermal energy storage implementations. *Materials Today: Proceedings*, 58, 1360–1367.
- Kara, Y. A. (2016). Diurnal performance analysis of phase change material walls. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1–8.
- Karaipekli, A., & Sari, A. (2016). Development and thermal performance of pumice/organic PCM/gypsum composite plasters for thermal energy storage in buildings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 149, 19–28.
- Konuklu, Y. & Paksoy, H. O. (2009). Phase change material sandwich panels for managing solar gain in buildings. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME*, 131(4), 041012.
- Konuklu, Y., Ostry, M., Paksoy, H. O., & Charvat, P. (2015). Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications. *Energy and Buildings*, 106, 134-155.
- Köse, E. (2019). *Binalarda Enerji Korunumu Açısından Yapı Bileşenlerinde Kullanılan Faz Değiştiren Malzemelerin Performansının Değerlendirilmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kurnuç, A. & Kara, Y. A. (2014). Energy evaluation of a phase change material wall covered with novel triple glass. *Journal of Thermal Science and Technology*, 34(1), 43-51.
- Li, D., Wu, Y., Liu, C., Zhang, G., & Arıcı, M. (2018a). Energy investigation of glazed windows containing Nano-PCM in different seasons. *Energy Conversion and Management*, 172, 119–128.
- Li, D., Wu, Y., Liu, C., Zhang, G., & Arıcı, M. (2018b). Numerical investigation of thermal and optical performance of window units filled with nanoparticle en-

- hanced PCM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 1321–1332.
- Li, D., Wu, Y., Zhang, G., Arıç, M., Liu, C., & Wang, F. (2018c). Influence of glazed roof containing phase change material on indoor thermal environment and energy consumption. *Applied Energy*, 222, 343–350.
- Li, D., Wu, Y., Wang, B., Liu, C., & Arıç, M. (2020). Optical and thermal performance of glazing units containing PCM in buildings: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 233). Elsevier Ltd.
- Li, Q., Ma, L., Li, D., Arıç, M., Yıldız, Ç., Wang, Z., & Liu, Y. (2021a). Thermoeconomic analysis of a wall incorporating phase change material in a rural residence located in northeast China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44.
- Li, Q., Wang, Y. Q., Ma, L. Y., Arıç, M., Li, D., Yıldız, Ç. & Zhu, Y. J. (2021b). Effect of sunspace and PCM louver combination on the energy saving of rural residences: Case study in a severe cold region of China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101126.
- Li, D., Yang, R., Arıç, M., Wang, B., Tunçbilek, E., Wu, Y., Liu, C. Y., Ma, Z. J. & Ma, Y. X. (2022). Incorporating phase change materials into glazing units for building applications: Current progress and challenges. *Applied Thermal Engineering*, 118374.
- Liu, C., Zhang, G., Arıç, M., Bian, J. & Li, D. (2019) Thermal performance of non-ventilated multilayer glazing facades filled with phase change material. *Solar Energy*, 177, 464–470.
- Murathan, E. K., & Manioğlu, G. (2020). Evaluation of phase change materials used in building components for conservation of energy in buildings in hot dry climatic regions. *Renewable Energy*, 162, 1919-1930.
- Oruç, O., Dinçer, İ. & Javani, N. (2019). Application of a ground source heat pump system with PCM-embedded radiant wall heating for buildings. *International Journal of Energy Research*, 43(12), 6542-6550.
- Özdemir, H. Ç. (2021). *Faz Değiştiren Malzemelerin Bina Duvarlarına Uygulanmasının Isıtma ve Soğutma Yüküne Etkisinin Araştırılması* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özdenefe, M. & Dewsbury, J. (2016). Thermal performance of a typical residential Cyprus building with phase change materials. *Building Service Engineering Research & Technology*, 37(1), 85-102.
- Pirasaci, T. (2020). Investigation of phase state and heat storage form of the phase change material (PCM) layer integrated into the exterior walls of the residential-apartment during heating season. *Energy*, 207.
- Sari, A., Karaipekli, A. & Kaygusuz, K. (2008). Capric acid and myristic acid for latent heat thermal energy storage. *Energy Sources Part A – Recovery Utilization and Environmental Effects*, 30(16), 1498-1507.
- Sari, A. (2014). Composites of polyethylene glycol (PEG600) with gypsum and natural

- clay as new kinds of building PCMs for low temperature-thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 69, 184–192.
- Sari, A., Bicer, A., Karaipekli, A., & Al-Sulaiman, F. A. (2018). Preparation, characterization and thermal regulation performance of cement based-composite phase change material. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, 523–529.
- Sari, A., Hekimoğlu, G., & Tyagi, V. V. (2020). Low cost and eco-friendly wood fiber-based composite phase change material: development, characterization and lab-scale thermoregulation performance for thermal energy storage. *Energy*, 195, 116983.
- Shaik, S., Arumugam, C., Shaik, S. V., Arıçlı, M., Afzal, A., & Ma, Z. (2022). Strategic design of PCM integrated burnt clay bricks: Potential for cost-cutting measures for air conditioning and carbon dioxide extenuation. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134077.
- Stritih, U., Tyagi, V. V., Stropnik, R., Paksoy, H., Haghghat, F., & Joybari, M. M. (2018). Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings. *Sustainable cities and society*, 41, 286-295.
- Tokuç, A., Başaran, T., & Yesügey, S. C. (2015). An experimental and numerical investigation on the use of phase change materials in building elements: The case of a flat roof in Istanbul. *Energy and Buildings*, 102, 91–104.
- Tokuç, A., Yesügey, S. C. & Başaran, T. (2017). An evaluation methodology proposal for building envelopes containing phase change materials: the case of a flat roof in Turkey's climate zones. *Architectural Science Review*, 60(5), 408-423.
- Tunçbilek, E., Arıçlı, M., Krajčik, M., Nižetić, S., & Karabay, H. (2020a). Thermal performance based optimization of an office wall containing PCM under intermittent cooling operation. *Applied Thermal Engineering*, 179.
- Tunçbilek, E., Arıçlı, M., Bouadila, S., Wonorahardjo, S. (2020b). Seasonal and annual performance analysis of PCM-integrated building brick under the climatic conditions of Marmara region. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141 (1), 613-624.
- Tunçbilek, E., Arıçlı, M., Krajcik, M., Li, Y. R., Jurcevic, M., Nizetic, S. (2022). Impact of nano-enhanced phase change material on thermal performance of building envelope and energy consumption. *International Journal of Energy Research*, 46(14), 20249-20264.
- Tyagi, V. V., Chopra, K., Kalidasan, B., Chauhan, A., Stritih, U., Anand, S., Pandey, A. K., Sari, A. & Kothari, R. (2021). Phase change material based advance solar thermal energy storage systems for building heating and cooling applications: A prospective research approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101318.
- Uludaş, M. Ç., Tuncbilek, E., Yıldız, Ç., Arıçlı, M., Li, D., & Krajčik, M. (2022). PCM-enhanced sunspace for energy efficiency and CO2 mitigation in a house in mediterranean climate. *Journal of Building Engineering*, 57, 104856.

- Wonorahardjo, S., Sutjahja, I. M., Tunçbilek, E., Achsani, R. A., Arıcı, M., & Rahmah, N. (2021). PCM-based passive air conditioner in urban houses for the tropical climates: An experimental analysis on the stratum air circulation. *Building and Environment*, 192, 107632.
- Yaras, A., Ustaoglu, A., Gencel, O., Sari, A., Hekimoglu, G., Sutcu, M., Erdogmus, E., Kaplan, G., Bayraktar, O. Y. (2022). Characteristics, energy saving and carbon emission reduction potential of gypsum wallboard containing phase change material. *Journal of Energy Storage*, 55(C), 105685.
- Zhang, G. J., Wang, Z. M., Li, D., Wu, Y. Y., Arıcı, M. (2020). Seasonal thermal performance analysis of glazed window filled with paraffin including various nanoparticles. *International Journal of Energy Research*, 44(4), 3008-3019.
- Zhang, S., Hu, W., Li, D., Zhang, C., Arıcı, M., Yıldız, Ç., Zhang, X., & Ma, Y. (2021). Energy efficiency optimization of PCM and aerogel-filled multiple glazing windows. *Energy*, 222.

Bölüm 18

MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ KULLANILARAK ELEKTRİKLİ EV ALETLERİNİN SINIFLANDIRILMASI¹

Bengisu Şeyda KOP²

Levent BAYINDIR³

Işıl KARABEY AKSAKALI⁴

1 Bu çalışma künyesi verilmiş olan yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Makine öğrenmesi yöntemleri ile ses tanıma uygulamaları, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim dalı, Yüksek Lisans Tez Danışmanı, Dr. Öğretim Üyesi Levent Bayındır, 2022.

2 Karayolları Genel Müdürlüğü, Bilgi Teknolojileri Dairesi Başkanlığı, Ağ ve Sistem Yönetimi Şubesi, Çankaya/ Ankara, bengisudurak2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0716-6455>

3 Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Yazılım Mühendisliği Anabilim dalı, İzmit/Kocaeli levent.bayindir@kocaeli.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-7318-5884>

4 Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim dalı, Yakutiye/ Erzurum, isil.karabey@erzurum.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4156-9098>



1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte ses tanıma sistemlerine olan ilgi artmıştır. Ses tanıma sistemlerinin kullanıldığı birçok alan vardır ve akıllı ev sistemleri bu alanlardan biridir. Akıllı ev sistemleri internetin ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte son yıllarda popüler hale gelmiştir. Akıllı evler, bireylerin hayatlarını kolaylaştırması açısından önemli bir gelişmedir. Başlangıçta sadece aydınlatma ve ısıtma sistemlerinde kullanılan akıllı evler, zamanla kullanım alanını genişleterek enerji tasarrufu sağlamaya ve güvenlik çözümleri sunmak amacıyla da kullanılmaktadır (Ricquebourg vd., 2006).

Fleury ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, TIMC-IMAG Grenoble Laboratuvarı tarafından sağlık akıllı ev sistemi oluşturulmuştur. Akıllı ev, TIMC-IMAG Grenoble Laboratuvarının algılayıcılar yerleştiği bir mutfak, bir yatak odası, bir oturma odası ve bir banyo olmak üzere 47 m^2 ölçülerinde donanımlı dairedir. Akıllı ev ve akıllı algılayıcıların hastalar hakkında bilgi edinmek için kullanıldığı ve bu konuda başarılı olduğu kanıtlanmıştır. Algılayıcılar yardımı ile kişinin duruşu ve hareketleri hakkında bilgi elde edilip, tehlikeli durumların tespiti yapılabilmektedir. Bu çalışmada ses ve konuşma tanıma sistemleri kullanılarak akıllı bir ev sunulmuştur. Çalışmada konuşma tanıma sistemi için 10 erkek ve 3 kadın olmak üzere toplamda 13 denekten alınan sesler kullanılmıştır. Her deneğin 45 cümle telaffuz etmesi gereken bir senaryo oluşturulmuştur. Çalışmada ses tanıma sistemi için veri kümesi, hastanın olağan aktiviteleriyle ilgili sesler (kapı çarpması, adım sesleri, kapı kilidi, bulaşık sesleri, telefon çalması) ve tehlikeli durumlara bağlı olarak ortaya çıkan sesler (cam kırılması, bir nesnenin düşmesi, çığlık) olmak üzere 2 farklı kategoriye karşılık gelen 8 sınıfa ayrılmıştır. Toplamda veri kümesinde 35 dakika 38 saniyelik, her biri “WAV” formatında olan 1985 ses dosyası bulunmaktadır. Ses sınıfları GMM (Gaussian Mixture Model) ve HMM (Hidden Markov Model) sınıflandırıcı ile sınıflandırılarak deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ses tanıma sistemi sonuçlarının konuşma tanımaya göre daha iyi olduğu bulunmuştur. Deneylere göre ses tanıma sonuçlarının iyi olduğu ve laboratuvar koşullarında elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu bulunmuştur (Fleury vd., 2008).

Güvensan ve Tayşi'nin yaptıkları çalışmada amaç, ev ortamında toplanan ses örneklerine göre çalışan ev aletleri seslerinin sınıflandırılmasıdır. Bu çalışmada farklı çalışma seviyelerinde, farklı sesler çıkaran ev aletlerinin günlük aktivitelerinin izlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada ev ortamında toplanan veri kümesi; buzdolabı, mikser, aspiratör, bulaşık makinesi, elektrik süpürgesi, çamaşır makinesi, saç kurutma makinesi ve havalandırma cihazlarının farklı çalışma modlarındaki seslerinden oluşturulmuştur. Veri kümesinde ayrıca ortamda olabilecek diğer çevresel sesler için ayrı bir sınıf oluşturulmuştur. Toplanan 30 saniyelik ses örnekleri 1 saniye uzunluğundaki ses örneklerine bölünmüştür. Veri kümesindeki seslerin hangi ev aletine ait olduğunun ve hangi çalışma modunda olduklarının bulunması için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada k-NN ve SVM algoritmaları ile yapılan deneyler sonucuna bakıldığında SVM algoritması ile %98 başarı oranı bulunmuştur. Bu çalışma sayesinde evdeki açık unutulmuş cihazlar tespit edilmiş ve çalışan cihazların tespiti ile evdeki enerji tüketiminin ölçümü yapılabilmektedir (Güvensan ve Tayşi, 2010).

Krishna ve Nagendram tarafından yapılan bir çalışmada ise engelli bireyler, yaşlılar ve yalnız yaşayanların hayatlarını kolaylaştırmak amacıyla akıllı ev otomasyon sistemi geliştirilmiştir. Ev otomasyonu sisteminde ses tanıma sistemi kullanılarak, evdeki ışıkların ve elektrikli aletlerin kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Sistemde ZigBee kablosuz iletişim modülü kullanılmaktadır. ZigBee, sesi alıp ARM9 denetleyicisine gönderir ve denetleyici gelen sesi işleyerek tekrar ZigBee modülüne gönderir. Daha sonra ZigBee, bağlı olduğu cihazın istenilen şekilde çalışması için cihaza komut gönderir. Sonuç olarak sesli komutların tanınması ile cihazlar açık veya kapalı konuma getirilmiş olur. Bir komut eğer doğru tanınmazsa cihaz denetleyiciye herhangi bir sinyal iletmemektedir. Çalışmada erkek ve kadın deneklerin her biri tarafından 35 farklı sesli komut gönderilmiştir. Böylece test aşamasında toplamda 1225 komut gönderilmiş ve %79,8 doğruluk bulunmuştur. Bu çalışma sayesinde kullanımı kolay kablosuz ev otomasyon sistemi ile engelli bireylerin, yaşlıların ve yalnız yaşayanların hayatları kolaylaşmıştır (Krishna ve Nagendram, 2012).

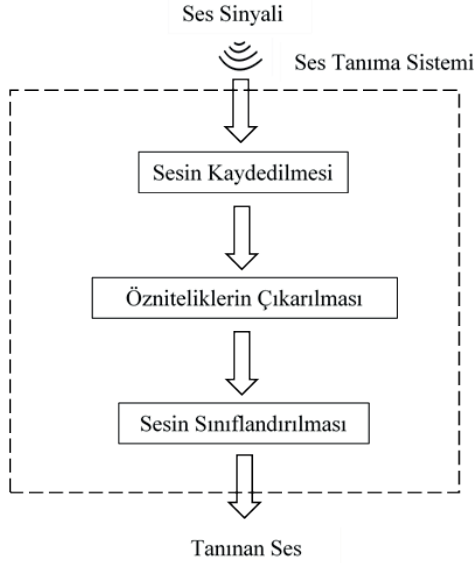
Baygın ve Karaköse tarafından yapılan başka bir çalışmada, ses tanıma sistemleri ile akıllı ev uygulaması geliştirilmiştir. Çalışmada mikroişlemciye bağlı olan lamba, perde ve motor kontrolü sağlanmaktadır. Veri kümesi bilgisayara bağlı bir adet mikروفon kullanılarak, 5 kişiden 6 farklı kelime sınıfından oluşturulmuştur. Her örnek kelime grubundan kişi başı 10 örnek alınarak toplamda 300 örnek kelime grubu oluşturulmuştur. Örnek kayıtlar 44 kHz frekansında, 16 bit ve 2 saniye uzunluğundadır. Eğitim için alınan kayıtların ses işleme aşamasında MFCC yöntemi ile katsayıları oluşturulmuştur. Test aşamasında ses tanıma sistemine 2 kişi daha dahil edilmiştir. Bu 7 kişi, 6 kelime sınıfından (“Lamba aç”, “Lamba kapat”, “Perde aç”, “Perde kapat”, “Motor aç”, “Motor kapat”) 15 adet söylemiş ve kelime başına toplamda 90 adet deneme yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda DTW yöntemi ile %92-%98 arası başarı sağlanmıştır (Baygın ve Karaköse, 2012).

Shah ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada amaç ev ve mahalle güvenliğini sağlamaktır. Çalışmada sesli bir Nesnelerin İnterneti (IoT) sistemi ile akıllı evde şiddet algılama sistemi önerilmiştir. Bu sistem bireyler uykudayken ya da evlerinden uzaktalarken olası tehlikeli sesleri tanıyarak olayı polise haber verme kabiliyetine sahiptir. IoT sistemi şüpheli sesleri algıladığında en yakındaki acil servislere durum bildirimini oluşturmaktadır. Çalışmadaki veri kümesi; ateşli silah, çığlık, patlama, siren ve cam kırılması sınıflarından oluşmaktadır. Her sınıfta, her biri 3-15 saniyelik ve “WAV” formatında olan 150 ses verisi bulunmaktadır. Çalışmada ses özniteliklerinin çıkarılması için MFCC yöntemi kullanılmış ve sınıflandırma aşamasında makine öğrenmesi yöntemleri ile deneyler yapılmıştır. Çalışmadaki deneysel sonuçlara göre CNN mimarisinin %89 doğruluk oranı ile diğer yöntemlere kıyasla en iyi performansı göstermiştir (Shah vd., 2018).

Literatürde bulunan çalışmalara bakıldığında akıllı evler; yaşlı ve engelli bireylerin hayatlarını kolaylaştırmak, güvenlik çözümleri sunmak, enerji tasarrufu sağlamak gibi birçok alanda fayda sağlamaktadır. Bu nedenle çalışmada akıllı evlerde kullanılmak üzere elektrikli ev aletlerinin sınıflandırılması yapılmıştır. Sınıflandırma aşamasında k-En Yakın Komşuluk (k-NN), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), Karar Ağacı (DT) ve Rastgele Orman (RF) gibi makine öğrenmesi algoritmalarından yararlanılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada elektrikli ev aletleri seslerinin sınıflandırılması için Python programlama dili tercih edilmiş ve bu programlama dili Jupyter Notebook platformunda kullanılmıştır. Çalışma veri kümesinin oluşturulması, öznitelik vektörlerinin oluşturulması ve elektrikli ev aletlerinin sınıflandırılması olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar Şekil 1’deki blok diyagramda gösterilmektedir ve aşağıda alt başlıklar halinde açıklanmaktadır.



Şekil 1. Elektrikli ev aletlerinin sınıflandırılma adımları

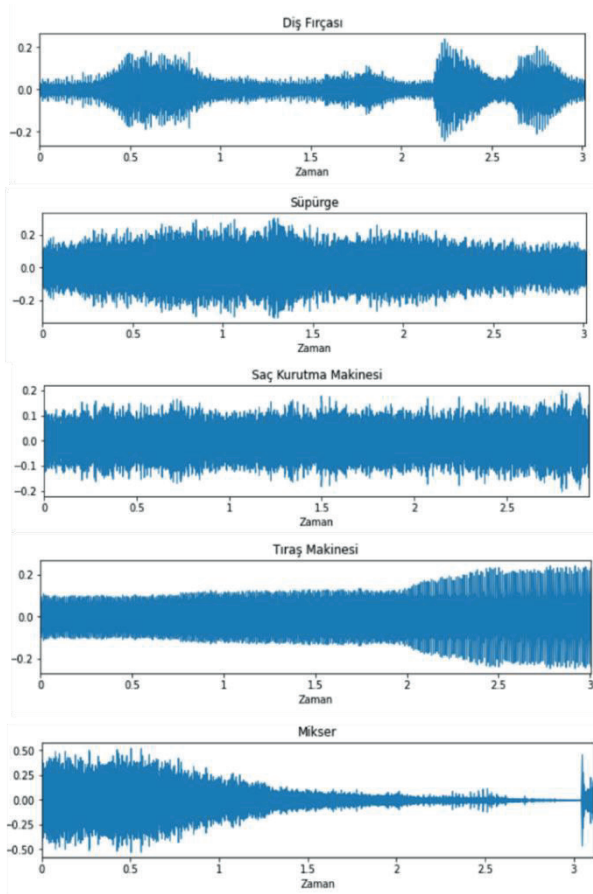
2.1. Veri Kümesinin Oluşturulması

Makine öğrenmesi yöntemleri kullanılırken en önemli aşamalardan biri veri kümesinin oluşturulmasıdır. Bu çalışmada kullanılan veri kümesi İnternet ortamında bulunan videolardan alınan seslerin parçalanması ile oluşturulmuştur. Veri kümesi, 2-4 sn uzunluk aralığındaki “WAV” uzantılı ses örneklerinden oluşturulmuştur. Elektrikli diş fırçası, süpürge, saç kurutma makinesi, tıraş makinesi ve el mikseri sesleri olmak üzere toplamda 5 sınıf bulunan veri kümesinde 700 adet ses örneği bulunmaktadır. Oluşturulan veri kümesinin sınıflara göre dağılımı Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Veri kümesinin içindeki seslerin kategorilere göre dağılımı

Sınıf	Örnek Sayısı
Diş Fırçası	133
Süpürge	127
Saç Kurutma Makinesi	160
Tıraş Makinesi	120
El Mikseri	160
Toplam	700

Veri kümesindeki her sınıfa ait temsili birer ses kaydının sinyal gösterimi Şekil 2’de gösterilmektedir.

**Şekil 2.** Her sınıfa ait birer ses kaydının sinyal gösterimi

2.2. Öznitelik Vektörlerinin Oluşturulması

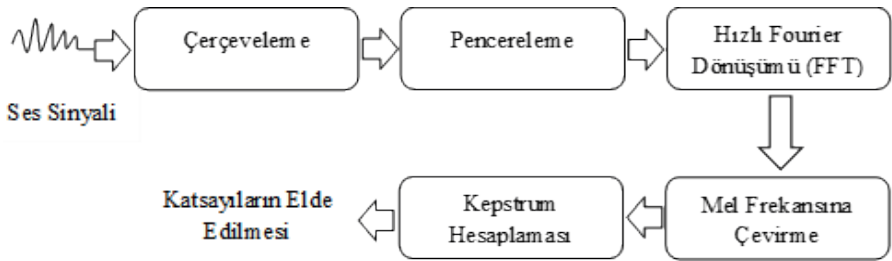
Öznitelik vektörlerinin oluşturulması için sınıflandırma aşamasında kullanılmak üzere ses sinyalinin karakteristiğini yansıtacak şekilde basit ve anlamlı veriler elde edilebilmesi gereklidir. Bu doğrultuda karmaşık sinyallerden anlamlı bilgilerin çıkarımı sonucunda öznitelik vektörü elde edilebilmektedir (Başbuğ, 2019).

Bu çalışmada sesin öznitelik vektörlerinin oluşturulması için sınıflandırma yöntemlerinde iyi performans veren MFCC ve LPCC yöntemleri ile deneyler yapılmıştır.

Mel frekans kepstum katsayıları (Mel frequency cepstral coefficients-MFCC):

Mel frekans kepstum katsayıları (MFCC) yöntemi, ses tanıma problemlerinde sıklıkla kullanılan öznitelik çıkarma yöntemlerinden biridir. Yöntem, mel frekans ölçeklerini kullanarak sesin spektral özelliklerinin elde edilmesini sağlar (Ateş, 2019).

MFCC öznitelik çıkarma yönteminde ses sinyalinin katsayılara dönüştürülmesi için belirli aşamalardan geçmesi gerekir. Bu aşamalar çerçeveleme, pencereleme, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT), mel frekansında çevirme ve kepstum hesaplamasıdır. Bu katsayıların elde edilme aşamaları Şekil 3'teki blok diyagramında gösterilmektedir.



Şekil 3. MFCC özniteliklerini çıkarma işleminin blok diyagramı

İlk aşama olan çerçevelemede ses sinyali belirli zaman aralıklarına bölünmektedir. Zaman aralıklarına bölünen ses sinyalinin kenar bölgelerinin zayıflatılıp, orta bölgelerinin güçlendirilmesi için pencereleme adımı uygulanır.

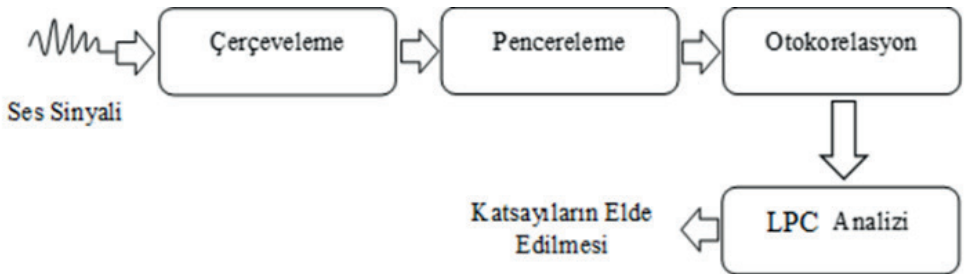
Yaygın olarak kullanılan pencereleme fonksiyonları Dikdörtgen, Hamming, Hanning, Gauss, Blackman ve Kaiser yöntemleridir. Pencereleme adımından sonra ise N örnekli her çerçeve, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile zaman uzayındaki çerçeve frekans uzayına çevrilir (Korkmaz, 2016). N örnekli her çerçeve için FFT hesabı Denklem 1'deki gibi tanımlanır.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} (x_n e^{-2\pi jnk/N}), k = 0,1,2, \dots N-1 \quad (1)$$

FFT uygulanan ses sinyali son aşamada Mel ölçekli filtreden geçirilir ve Mel frekans kepstümü hesaplanır (Karasartova, 2011). Elde edilen kepstüm katsayıları ile öznitelik vektörü oluşturulur.

Doğrusal öngörülü kepstüm katsayıları (Linear prediction cepstral coefficients-LPCC):

Doğrusal Öngörülü Keptüm Katsayıları (LPCC) yöntemi temel olarak, Doğrusal Önkestirim Kodlama (LPC) katsayılarının Fourier dönüşümü ile kepstüm katsayılarına dönüştürülmesi işlemidir. Doğrusal Öngörülü Keptüm Katsayıları (LPCC) öznitelik çıkarma yönteminde ses sinyalinin katsayılarına dönüştürülmesi için belirli aşamalardan geçmesi gerekir. Bu aşamalar çerçeveleme, pencereleme, otokorelasyon ve LPC analizi olmak üzere Şekil 4'teki blok diyagramında gösterilmektedir.



Şekil 4. LPCC özniteliklerini çıkarma işleminin blok diyagramı

LPCC yönteminin çerçeveleme ve pencereleme adımları MFCC yöntemi ile aynıdır. Otokorelasyon aşamasında ise pencerelenmiş ses sinyallerinin analizi yapılır. Otokorelasyon Denklem 2'deki gibi hesaplanır.

$$r_1(k) = \sum_{n=0}^{N-1-k} \widehat{x}_1(n) \cdot \widehat{x}_1(n+k), k = 0,1,2,\dots,p \quad (2)$$

Denklemde gösterilen p , LPC analizinin derecesidir ve genellikle 8-16 arasında bir değer seçilmektedir (Eray, 2008).

Otokorelasyon aşamasından sonra Doğrusal Öngörülü Kodlama (LPC) analizi yapılır. LPC yönteminde n zamanda verilen $s(n)$ ses örnekleri, önceki p tane ses örneğinden yaklaşık olarak Denklem 3'teki gibi hesaplanır (Eray, 2008).

$$S(k) = \sum_{i=1}^p a_i s(k-i) \quad (3)$$

Denklemdeki $S(k)$ k zamandaki ses örneği, p LPC'nin derecesi ve a_i katsayılar olarak ifade edilmektedir.

LPC analizi yapıldıktan sonra, LPC katsayılarına Fourier dönüşümü yapılarak kepsral katsayılar oluşturulur. Elde edilen kepsrum katsayıları ile öznitelik vektörü oluşturulur.

2.3. Elektrikli Ev Aletlerinin Sınıflandırılması

Öznitelikleri çıkarılan sesler, son aşamada makine öğrenmesi algoritmaları ile sınıflandırılır. Bu çalışmada kullanılan sınıflandırma algoritmaları alt başlıklar halinde aşağıda açıklanmaktadır.

2.3.1. K-en yakın komşuluk (K-nearest neighborhood)

K en yakın komşuluk (k-NN) yöntemi, sınıflandırma problemlerinde sık kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem sınıflandırma yaparken, sınıfları

önceden belirlenmiş olan örnek bir veri kümesi kullanarak, veri kümesine yeni katılacak olan verinin en yakın komşuluklarına bakar. Örneğin k değeri 3 olarak seçilmiş ise yeni gelen veri sınıflandırılırken en yakın 3 komşuluklarına bakılır. Bakılan komşuluklar içinde en fazla hangi sınıfın verisi varsa yeni gelen verinin sınıfı o olur.

Yeni gelen verinin en yakın komşuluklarına olan mesafesinin hesaplanması için Öklid, Manhattan, Minkowski veya Chebyshev mesafe fonksiyonları kullanılır. Öklid fonksiyonu, sınıflandırma algoritmalarında en sık kullanılan fonksiyondur.

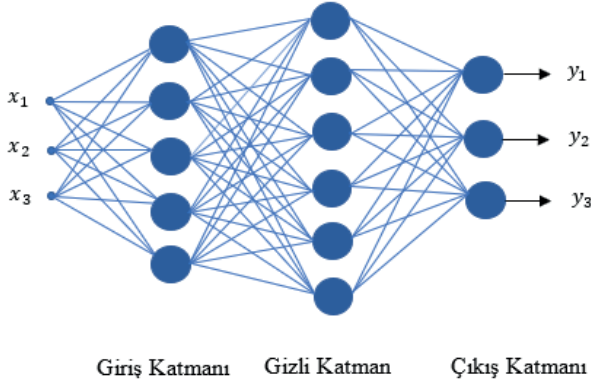
Öklid uzaklığı, iki nokta arasındaki doğrusal uzaklık olarak tanımlanmaktadır. P ve Q herhangi iki nokta $P = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ve $Q = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ olmak üzere, aralarındaki mesafe Öklid fonksiyonu ile Denklem 4'deki şekilde hesaplanmaktadır (Taşcı ve Onan, 2016).

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

2.3.2. Çok katmanlı algılayıcı (Multi layer perceptrons)

Çok katmanlı algılayıcı (MLP) yöntemi, yapay sinir ağları modellerinin ileri beslemeli sinir ağı yapısındadır. İleri beslemeli bir yapay sinir ağında sinyaller girişten çıkışa doğru yayılır.

Bir MLP yapısında nöronlar katmanlar şeklinde organize olmaktadır. Genel olarak bir MLP yapısı, dış dünyadan alınan verilerin okunduğu bir giriş katmanı, verilerin işlendiği bir veya daha fazla sayıda gizli katman ve her bir girdi değerine karşılık çıktı değeri üreten bir çıkış katmanı içermektedir. Çıktı katmanı, sınıfların olduğu katmandır ve sınıf sayısı kadar nöron içermektedir (Kaynar vd., 2016). MLP yönteminin üç katmanlı olan bir örneği Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Üç katmanlı ileri beslemeli sinir ağı örneği

2.3.3. Karar ağacı (Decision tree)

Karar ağacı (DT) yöntemi, yorumlanması kolay, güvenilirliği yüksek olması ve veri tabanı sistemleri ile kolayca bütünleştirilebilmeleri gibi nedenlerden dolayı sınıflandırma yöntemleri arasında yaygın kullanıma sahip bir yöntemdir (Emel ve Taşkın, 2005). Bu yöntem, sınıfları belirli olan veri örneklerini kullanarak kural tabanlı bir ağaç yapısı oluşturmayı amaçlar. DT, en iyi tahmini bulabilmek için bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi araştırıp, en güçlü ilişkiye sahip bağımsız değişkeni bulur. Veri kümesi belirlenen bağımsız değişkenin değerine göre ikiye ayrılır ve tüm bölünmeler bitene kadar bu süreç devam ettirilir (Büyükarıkan, 2020).

DT yapısı, düğüm, dal ve yaprak olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Ağacın en tepesindeki düğüme kök düğüm denir. Ağacın en alt kısmında ise yapraklar bulunur. Kök düğüm ile yapraklar arasında kalan kısım ise dallar bulunur (Kavzoğlu ve Çölkesen, 2010).

2.3.4. Rastgele orman (Random forest)

Breiman (2001) tarafından geliştirilen Rastgele orman (RF) yöntemi, temelinde DT olan bir yöntemdir. RF yönteminin amacı, tek bir DT oluşturmak yerine farklı eğitim kümeleri ile eğitilmiş olan çok fazla sayıda DT oluşturup, bu ağaçları birleştirmektir.

RF yöntemi, bir tahmin modeli oluştururken iki parametreye ihtiyaç duyar: istenilen sınıflandırma ağacının sayısı k ve ağacı büyötmek için her düğümde kullanılan değişken sayısı m . RF, yeni gelen veriyi sınıflandırmak için m adet rastgele seçilmiş değişken kullanır ve veri kümesindeki her örnek k adet kadar ağaç tarafından sınıflandırılır. Her bir DT, sınıflandırma sonuçlarında en sık bulunan değere göre yeni gelen verinin sınıfı belirlenmiş olur (Rodriguez-Galiano vd., 2012).

2.3.5. Model Performansının Değerlendirilmesi

Yapılan deneylerin performanslarını ölçmek için doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall), F1 skoru (F1 score) ve dengeli doğruluk (balanced accuracy) değerleri karmaşıklık matrisi (confusion matrix) kullanılarak hesaplanmıştır. Karmaşıklık matrisinin (confusion matrix) yapısı Tablo 2’de gösterilmektedir.

Tablo 2. Karmaşıklık matrisinin yapısı

		Gerçek Değerler	
		Pozitif	Negatif
Tahmin Edilen Değerler	Pozitif	TP	FP
	Negatif	FN	TN

TP: Tahmin edilen değer pozitif ve doğru

TN: Tahmin edilen değer negatif ve doğru

FP: Tahmin edilen değer pozitif ve yanlış

FN: Tahmin edilen değer negatif ve yanlış

$$Doğruluk = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (5)$$

$$Hassasiyet = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

$$Duyarluluk = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

$$F1 = 2 * \frac{Hassasiyet * Duyarluluk}{Hassasiyet + Duyarluluk} \quad (8)$$

$$Dengeli Doğruluk = \frac{1}{2} * \left(\frac{TP}{TP + FN} + \frac{TN}{TN + FP} \right) \quad (9)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Veri kümelerindeki ses sinyallerinin ilk adımda MFCC ve LPCC yöntemleri ile öznitelikleri çıkarılmış ve daha sonra k-NN, MLP, DT ve RF sınıflandırma yöntemleri ile bu sesler sınıflandırılmıştır.

k-NN sınıflandırma yönteminde k değeri için en uygun değer bulunması için deneyler yapılmıştır. MFCC ve LPCC yöntemleri ile yapılan deneylerin sonuçlarına göre k=3 ile uygulamanın daha iyi performans verdiğini göstermektedir. Bu nedenle çalışmanın devamında k=3 kullanılmıştır.

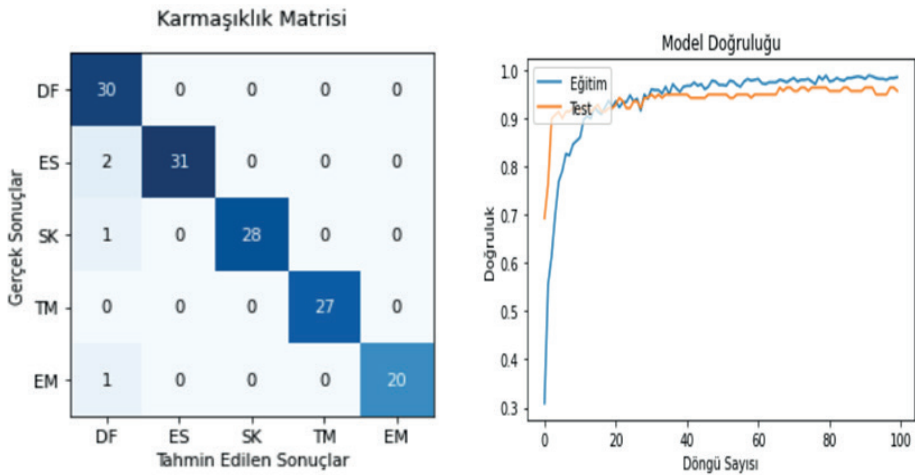
MFCC yöntemi kullanılarak hesaplanan doğruluk, hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru ve dengeli doğruluk sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. MFCC yöntemi kullanılarak sınıflandırma yöntemlerinin karşılaştırılması

	3-NN	MLP	DT	RF
Doğruluk	%95	%96	%88	%92
Hassasiyet	%95	%97	%88	%96
Duyarlılık	%96	%96	%88	%92
F1	%96	%96	%88	%94
Dengeli Doğruluk	%96	%97	%89	%93

DeneySEL sonuçlara göre MLP yöntemi ile %96 doğruluk, %97 hassasiyet, %96 duyarlılık, %96 F1 skoru ve %97 dengeli doğruluk ile diğer yöntemlere göre daha iyi performans göstermiştir.

Çalışmada yapılan deneylerin sonuçlarına göre MFCC yöntemi ile en iyi performans veren yöntemin karmaşıklık matrisi ve grafik üzerinde gösterimleri Şekil 6'da gösterilmektedir. Grafikteki DF elektrikli diş fırçası, ES elektrikli süpürge, SK saç kurutma makinesi, TM tıraş makinesi, EM el mikseri olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 6. MLP sınıflandırıcısı kullanılarak hesaplanan karmaşıklık matrisi ve grafik

Yapılan deneyler sonucunda k-NN, MLP, DT ve RF sınıflandırıcılar ile LPCC yöntemi kullanılarak hesaplanan doğruluk, hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru ve dengeli doğruluk sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir.

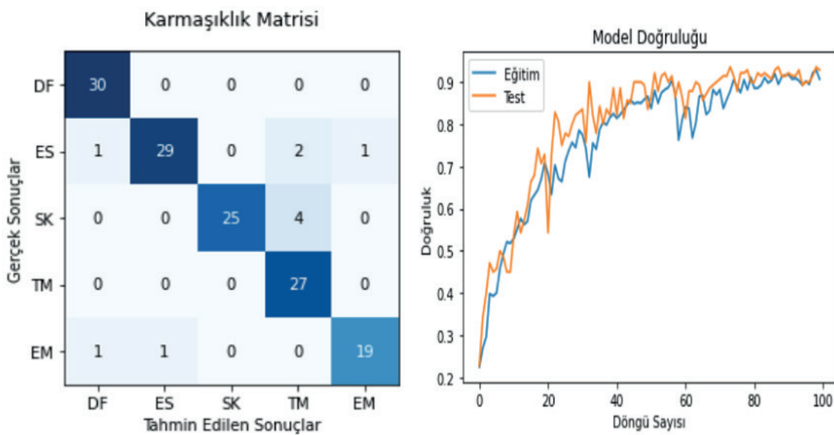
Tablo 4. LPCC yöntemi kullanılarak sınıflandırma yöntemlerinin

	3-NN	MLP	DT	RF
Doğruluk	%91	%90	%85	%82
Hassasiyet	%92	%93	%85	%92
Duyarlılık	%91	%90	%85	%82
F1	%92	%92	%85	%87
Dengeli Doğruluk	%92	%91	%86	%83

karşılaştırılması

DeneySEL sonuçlara göre k-NN yöntemi %91 doğruluk, %92 hassasiyet, %91 duyarlılık, %92 F1 skoru ve %92 dengeli doğruluk ile diğer yöntemlere göre daha iyi performans göstermiştir.

Çalışmada yapılan deneylerin sonuçlarına göre LPCC yöntemi ile en iyi performans veren yöntemin karmaşıklık matrisi ve grafik üzerinde gösterimleri Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. k-NN sınıflandırıcısı kullanılarak hesaplanan karmaşıklık matrisi ve grafik

4. SONUÇ

Bu çalışmada ses tanıma sistemlerinin kullanıldığı popüler alanlardan biri olan akıllı ev sistemlerinde kullanılmak üzere süpürge, saç kurutma makinesi, mikser gibi elektrikli ev aletlerinin sesleri sınıflandırılmıştır. Veri kümelerindeki ses sinyallerinin özniteliklerinin çıkarılmasında MFCC ve LPCC yöntemleri kullanılmıştır. Sınıflandırma aşamasında ise k-NN, MLP, DT ve RF sınıflandırıcılar ile deneyler yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre MFCC yönteminin LPCC yöntemine göre daha başarılı olduğu bulunmuştur.

Yapılan deneylerin sonucunda MFCC yöntemi kullanılarak MLP sınıflandırıcısında %96 oranında başarı performansı sağlanmıştır. Bu sonuç ile evdeki elektrikli ev aletlerinin tanınması başarılı bir şekilde yapılmış olmaktadır.

Bu çalışmanın devamında elektrikli ev aleti tanıma sistemi ile evdeki enerji tüketiminin ölçümünü ile güç tasarrufu yapılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Ateş E., 2019. Derin öğrenme ile sesli komut tanıma, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Başbuğ AM., 2019. Ses olayı tanıma ve akustik sahne geri getirimi, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Baygın M., Karaköse M., 2012. “Real time voice recognition based smart home application”, 2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Muğla,1-4.
- Büyükarıkan U., 2020. “Finansal performans etki eden finansal değişkenlerin CHAID karar ağacıyla belirlenmesi: tekstil sektörü örneği”, Aydın İktisat Fakültesi Dergisi, 5(1), 1-10.
- Breiman L., 2001. “Random Forests”, Machine Learning, 45, 5- 32.
- Emel GG., Taşkın Ç., 2005. “Veri madenciliğinde karar ağaçları ve bir satış analizi uygulaması”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi, 6(2), 221-239.
- Eray O., 2008. Destek Vektör Makineleri ile Ses Tanıma Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Fleury A., Noury N., Vacher M., Glasson H., Seri JF., 2008. Sound and Speech Detection and Classification in a Health Smart Home, 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vancouver, BC, Canada, 4644-4647.
- Güvensan MA., Tayşi ZC., 2010. Environmental sound classification for recognition of house appliances. 2010 IEEE 18th Signal Processing and Communications Applications Conference, Diyarbakır, 431-434.
- Karasartova S., 2011. Metinden bağımsız konuşmacı tanıma sistemlerinin incelenmesi ve gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kavzoğlu T., Çölkesen İ., 2010. “Karar Ağaçları İle Uydu Görüntülerinin Sınıflandırılması: Kocaeli Örneği”, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2(1), 36-45.

- Kaynar O., Görmez Y., Yıldız M., Albayrak A., 2016. Makine öğrenmesi yöntemleri ile duygu analizi, International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium, Malatya, 234- 241.
- Korkmaz OE., 2016. Ses Sinyalinden Duygu Tanıma, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Krishna YB., Nagendram S, 2012. “Zigbee based voice control system for smart home”, International Journal on Computer Technology and Applications, 3(1), 163-168.
- Ricquebourg V., Menga D., Durand D., Marhic B., Delahoche L., Loge C., 2006. The Smart Home Concept: our immediate future. 2006 1ST IEEE International Conference on E-Learning in Industrial Electronics, Hammamet, Tunisia, 23-28.
- Rodriguez-Galiano VF., Ghimire B, Rogan J, Chica-Olmo M, Rigol-Sanchez JP, 2012. “An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 67(0924-2716), 93-104.
- Shah SK., Tariq Z, Lee Y, 2018. Audio IoT Analytics for Home Automation Safety. 2018 IEEE International Conference on Big Data, Seattle, WA, USA, 5181-5186.
- Taşcı E., Onan A., 2016. K-En Yakın Komşu Algoritması Parametrelerinin Sınıflandırma Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Akademik Bilişim Konferansı, Aydın, 1-8.

Bölüm 19

ZAMAN GECİKMESİ VE KESİR DERECELİ PI DENETLEYİCİ İÇEREN JENERATÖR UYARMA KONTROL SİSTEMİNİN KARARLILIK BÖLGELERİNİN HESAPLANMASI

Deniz KATIPOĞLU¹



¹ Arş. Gör. Dr. Deniz Katipoğlu, Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray,
denizkatipoglu@aksaray.edu.tr, 0000-0003-3082-3879

1.GİRİŞ

Bu kitap bölümü zaman gecikmelisi ve kesir dereceli PI denetleyici içeren jeneratör uyarma kontrol sisteminin kararlılık bölgelerinin hesaplanmasını incelemektedir. Elektrik güç sistemlerinde sistem frekansını ve jeneratör çıkış voltajını belirli değerler arasında tutmak için otomatik gerilim regülatörü (OGR) olarak da bilinen yük frekans kontrolü (YFK) ve uyarım kontrol sistemi her bir jeneratör için kurulmaktadır [1, 2]. Uyarım kontrol sistemlerinde açık iletişim hatlarının ve fazör ölçüm birimlerinin yoğun olarak kullanılmasından dolayı ölçüm ve iletişim gecikmelerini içeren kaçınılmaz zaman gecikmelerine neden olmaktadır [3, 4]. Denetleyici tasarımında zaman gecikmeleri sistem dinamikleri üzerinde istikrarsızlaştırıcı etkiye sahip olabileceğinden ihmal edilmemeli ve dikkate alınmalıdır. Literatürde zaman gecikmesinin etkisini analiz eden pek çok çalışma bulunmaktadır [5-7]. Ayasun ve Gelen, jeneratör uyarma kontrol sisteminde sistemin sınırdaki kararlı kalacağı maksimum zaman gecikmesini hesaplamışlardır. Yine farklı bir çalışmada Ayasun ve arkadaşları, stabilizasyon trafolu zaman gecikmesi içeren jeneratör uyarma kontrol sisteminin kararlılık gecikme marjını direk yöntem kullanarak bulmuşlardır.

İletişim zaman gecikmelisi içeren jeneratör uyarma kontrol sistemlerinde gerilim çıkışındaki kararlı durum hatalarını düzeltmek ve yanıtı iyileştirmek için genellikle orantılı-türev-integral (PID) veya orantılı-integral (PI) kontrolörleri kullanılmaktadır [8-10]. Fakat son yıllarda kesir dereceli PI kontrolörler esnekliği arttırması ve daha iyi performans sağladığından dolayı tercih edilmektedirler [11]. Kesir dereceli PI kontrolörler geleneksel PI kontrolörlere göre daha az yerleşme süresi, yükselme ve aşma sürelerine sahiptirler [12].

Jeneratör uyarma kontrol sisteminin kararlılığını garanti eden kesir dereceli PI denetleyici kazanç değerlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu yüzden bu yazıda, jeneratör uyarma kontrol sisteminin kararlılığını sağlayan tüm kesir dereceli PI denetleyici parametreleri değerlerini hesaplamak için analitik bir yöntem olan kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanılmaktadır [13,14]. Yöntemin amacı daha önce belirlenen herhangi bir zaman gecikmesi değerinde sistemin kararlılığını garantileyen tüm denetleyici parametre değerlerini belirleyebilmektir. Bunun için öncelikle sistemin karakteristik denkleminin sanal ve reel bileşenleri sıfıra eşitlenmektedir ve sistemin PI değerleri hesaplanmaktadır. Bu çözüm sonucunda kararlılık bölgesinin

oluşmasını sağlayan kompleks kök sınır (Complex Root Boundary, CRB) eğrisi ve reel kök sınır (Real Root Boundary, RRB) eğrisi elde edilmektedir. [15-16]'da bu yöntem kullanılarak zaman gecikmeli bir bölgeyi yük frekans kontrol sistemi ve dinamik talep zamanı içeren sistemde sistemin kararlılığını sağlayan PI denetleyici parametre değerleri hesaplanmıştır.

Bu kitap bölümünün temel amacı, jeneratör uyarma kontrol sisteminin denetleyici parametre uzayında kararlılık sınır eğrisi yöntemiyle kararlılık bölgelerini analiz etmektir. Bu yüzden çalışmanın önemli katkıları aşağıda belirtilmiştir:

- Jeneratör uyarma kontrol sisteminin zaman gecikmelerinin etkisi dikkate alınarak önceden belirlenen herhangi bir zaman gecikme değeri için kararlılık bölgeleri hesaplanmıştır.
- Jeneratör uyarma kontrol sisteminde kesir dereceli PI denetleyicisinin kesir derecesi değerinin kararlılık bölgeleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Kesir dereceli PI denetleyici kullanmanın sistemin esnekliğini arttırdığı gözlemlenmiştir.
- Jeneratör uyarma kontrol sisteminin haberleşme zaman gecikmelerinin kararlılık bölgeleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Bu durum, zaman gecikmesinin kararlılık bölgeleri ve sistemin kararlılık payı üzerinde olumsuz etkilerinin olduğunu göstermektedir.
- Son olarak, elde edilen kararlılık bölgelerinin doğruluğu, Matlab/Simulink [17] ortamında yapılan simülasyon çalışmaları ile gösterilmiştir.

2. Zaman Gecikmelisi ve Kesir Dereceli PI Denetleyici İçeren Jeneratör Uyarma Kontrol Sistem Modeli

Sistem dinamiklerinin analiz edilmesi ve bir kontrollör tasarlamak için genellikle doğrusal veya doğrusallaştırılmış modeller kullanılır. Şekil 1, sistemin kararlılık analizinde kullanılması için zaman gecikmesi ve kesir dereceli PI içeren jeneratör uyarma kontrol sisteminin blok şemasını göstermektedir. Modelde gösterilen doğrultucu, jeneratör, yükselteç, doğrultucu ve uyarıcı birinci dereceden transfer fonksiyonu ile modellenmiştir. Transfer fonksiyonları aşağıdaki gibidir [18]:

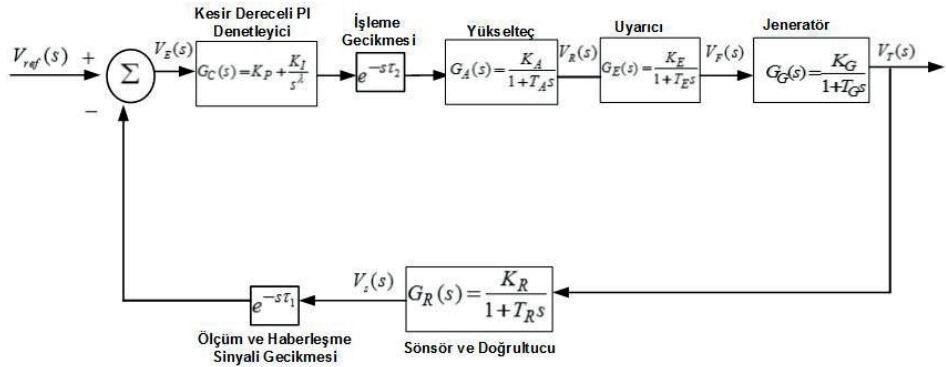
$$\begin{aligned} G_A(s) &= \frac{K_A}{1+sT_A}, & G_E(s) &= \frac{K_E}{1+sT_E} \\ G_G(s) &= \frac{K_G}{1+sT_G}, & G_R(s) &= \frac{K_R}{1+sT_R} \end{aligned} \quad (1)$$

Burada K_A , K_R , K_G , K_E sırasıyla yükselteç, doğrultucu, jeneratör ve uyarıcı kazançlarını, T_A , T_R , T_G , T_E ise her bir kazançlara karşılık gelen zaman sabitlerini göstermektedir. Kesir dereceli PI denetleyicinin transfer fonksiyonu ise Eşitlik 2.'deki gibidir:

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s^\lambda} \quad (2)$$

Burada λ , integral denetleyicinin kesirli mertebesidir ve değeri $0 < \lambda < 2$ 'den seçilir [19].

Şekil 1'de iletim ve ölçüm gecikmeleri (τ_1) ve işleme gecikmesi (τ_2) olmak üzere toplanarak sistemin ileri besleme yönüne eklenir ve $\tau_1 + \tau_2 = \tau$ şeklinde yazılır.



Şekil 1. Jeneratör uyarma kontrol sisteminin blok diyagramı

Zaman gecikmeli içeren jeneratör uyarma kontrol sisteminin kesir dereceli PI denetleyici kullanılarak oluşturulan karakteristik denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\Delta(s, \lambda, \tau) = P(s) + Q(s)e^{-s\tau} = 0 \quad (3)$$

$P(s)$ ve $Q(s)$, aşağıda verilen gerçek katsayılarla polinomlardır:

$$\begin{aligned} &= p_5 s^{4+\lambda} + p_4 s^{3+\lambda} + p_3 s^{2+\lambda} + p_2 s^{1+\lambda} + p_1 s^\lambda \\ &+ (q_1 s^\lambda + q_0) e^{-s\tau} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Burada

$$\begin{aligned} p_5 &= T_A T_E T_G T_R, p_4 = T_A T_E T_R + T_A T_E T_G + T_E T_G T_R + T_A T_G T_R, \\ p_3 &= T_A T_E + T_E T_G + T_G T_R + T_E T_R + T_G T_A, \\ p_2 &= T_A + T_E + T_G + T_R, \\ p_1 &= 1 \\ q_1 &= K_A K_E K_G K_R K_P, q_0 = K_A K_E K_G K_R K_I \end{aligned} \quad (5)$$

3. Kararlılık Bölgelerinin Analizi

Bu bölümde Eşitlik 3.'de verilen karakteristik denklem kullanılarak kararlılık sınır eğrisi yöntemiyle sistemin sınırda kararlı olacağı kesir dereceli PI değerleri hesaplanmıştır. Bu işlemler için öncelikle Eşitlik 3.'de verilen denklemde $s = j\omega$, $e^{-j\omega\tau} = \cos(\omega\tau) - j\sin(\omega\tau)$ ve $j^\lambda = \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + j\sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)$ yerine yazılarak çözülmüştür. Elde edilen denklem sanal ve reel kısımlarına ayrılmış ve K_P ve K_I denetleyici parametreleri olarak aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
\Delta(j\omega, \lambda, \tau) = & p_5 \omega^{4+\lambda} \cos\left(\frac{(4+\lambda)\pi}{2}\right) + p_4 \omega^{3+\lambda} \cos\left(\frac{(3+\lambda)\pi}{2}\right) \\
& + p_3 \omega^{2+\lambda} \cos\left(\frac{(2+\lambda)\pi}{2}\right) \\
& + p_2 \omega^{1+\lambda} \cos\left(\frac{(1+\lambda)\pi}{2}\right) + p_1 \omega^\lambda \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + \\
& \left(K_P \left(q_1' \omega^\lambda \cos(\omega\tau) \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + q_1' \omega^\lambda \sin(\omega\tau) \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) \right) + \right. \\
& \left. K_I(q_0'' \cos(\omega\tau)) \right) \tag{6}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + j(p_5 \omega^{4+\lambda} \sin\left(\frac{(4+\lambda)\pi}{2}\right) + p_4 \omega^{3+\lambda} \sin\left(\frac{(3+\lambda)\pi}{2}\right) \\
& + p_3 \omega^{2+\lambda} \sin\left(\frac{(2+\lambda)\pi}{2}\right) \\
& + p_2 \omega^{1+\lambda} \sin\left(\frac{(1+\lambda)\pi}{2}\right) + p_1 \omega^\lambda \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + \\
& \left(K_P \left(-q_1' \omega^\lambda \sin(\omega\tau) \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) - q_1' \omega^\lambda \cos(\omega\tau) \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) \right) + \right. \\
& \left. K_I(-q_0'' \sin(\omega\tau)) \right)
\end{aligned}$$

$$= R\{\Delta(j\omega, \lambda, \tau)\} + jIm\{\Delta(j\omega, \lambda, \tau)\} = 0$$

Eşitlik 6.'nın sanal ve reel kısımları sıfıra eşitlenerek Eşitlik 7.'deki denklemler elde edilir:

$$K_P A(\omega) + K_I B(\omega) + C(\omega) = 0$$

$$K_P D(\omega) + K_I E(\omega) + F(\omega) = 0 \tag{7}$$

Burada,

$$A(\omega) = q_1' \omega^\lambda \cos(\omega\tau) \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + q_1' \omega^\lambda \sin(\omega\tau) \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)$$

$$B(\omega_c) = q_0'' \cos(\omega\tau)$$

$$C(\omega) = p_5 \omega^{4+\lambda} \cos\left(\frac{(4+\lambda)\pi}{2}\right) + p_4 \omega^{3+\lambda} \cos\left(\frac{(3+\lambda)\pi}{2}\right)$$

$$+ p_3 \omega^{2+\lambda} \cos\left(\frac{(2+\lambda)\pi}{2}\right)$$

$$+ p_2 \omega^{1+\lambda} \cos\left(\frac{(1+\lambda)\pi}{2}\right) + p_1 \omega^\lambda \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)$$

$$\begin{aligned}
D(\omega_c) &= -q_1' \omega^\lambda \sin(\omega\tau) \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) - q_1' \omega^\lambda \cos(\omega\tau) \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) \\
E(\omega_c) &= -q_0'' \sin(\omega\tau) \\
F(\omega_c) &= p_5 \omega^{4+\lambda} \sin\left(\frac{(4+\lambda)\pi}{2}\right) + p_4 \omega^{3+\lambda} \sin\left(\frac{(3+\lambda)\pi}{2}\right) \\
&\quad + p_3 \omega^{2+\lambda} \sin\left(\frac{(2+\lambda)\pi}{2}\right) \\
&\quad + p_2 \omega^{1+\lambda} \sin\left(\frac{(1+\lambda)\pi}{2}\right) + p_1 \omega^\lambda \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)
\end{aligned}$$

Eşitlik 7.'de verilen iki denklem kullanılarak K_P ve K_I çözümü, aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}
K_P &= \frac{B(\omega_c)F(\omega_c) - E(\omega_c)C(\omega_c)}{A(\omega_c)E(\omega_c) - B(\omega_c)D(\omega_c)} \\
K_I &= \frac{D(\omega_c)C(\omega_c) - A(\omega_c)F(\omega_c)}{A(\omega_c)E(\omega_c) - B(\omega_c)D(\omega_c)}
\end{aligned} \tag{8}$$

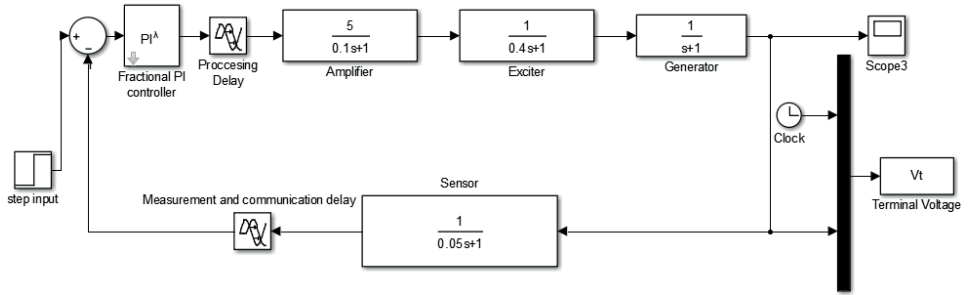
Eşitlik 8.'in çözümünden, (K_P, K_I) düzleminde $\ell(K_P, K_I, \omega_c)$ kararlılık sınır eğrisi elde edilir. Bu eğri kararlılık bölgesinde kompleks kök sınırı (Complex Root Boundary, CRB) olarak adlandırılır. Ayrıca, Eşitlik 3.'de verilen zaman gecikmesi içeren jeneratör uyarma kontrol sisteminin reel kökleri $s = 0$ 'da sanal eksenine kesebileceğinden dolayı $\omega = 0$ için sistemin reel kök sınır eğrisi (Real root boundary, RRB) belirlenmelidir. Sonuç olarak, RRB ve CRB eğrileri denetleyici parametre düzlemini kararsız ve kararlı bölgelere ayırmaktadır. Hesaplanan kararlılık bölgelerinden seçilen (K_P, K_I) denetleyici test noktaları için jeneratör uyarma kontrol sisteminin kararlılık analizi belirlenebilir.

4. Sonuçlar ve Tartışmalar

Bu bölümde, jeneratör uyarma kontrol sisteminin belirli bir zaman gecikmesi değerinde kararlılık bölgeleri verilmiştir. Ayrıca, kararlılık bölgelerindeki, zaman gecikmesinin ve kesir derecesinin etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan simülasyon çalışmaları ile gösterilmiştir. Şekil 1'de verilen uyarıcı sistemin Simulink

modeli Şekil 2'de verilmiştir. Simulink'in transfer fonksiyon blokları amplifikatör, uyarıcı, jeneratör ve sensörü modellemek için kullanılmıştır. Geribesleme yolundaki ölçüm/iletişim gecikmesi, ileri besleme yolundaki işlem gecikmesi ve kesir dereceli PI denetleyici, sırasıyla Simulink'in taşıma gecikme bloğu ve kesir dereceli PI denetleyici bloğu kullanılarak modellenmiştir. Herhangi bir zaman gecikmesi ve sistem parametresi için, bir adım girişine sistem yanıtı elde edilir. V_t kutusu ve kapsamı, bir adım girişi üzerine çıkış voltajı verilerini ve dalga formlarını elde etmek içindir. Jeneratör uyarma kontrol sisteminin parametreleri aşağıdaki gibidir [20]:

$$K_A = 5, K_E = 1, K_G = 1, K_R = 1, T_A = 0.1, T_E = 0.4, T_G = 1, T_R = 0.05 \quad (9)$$



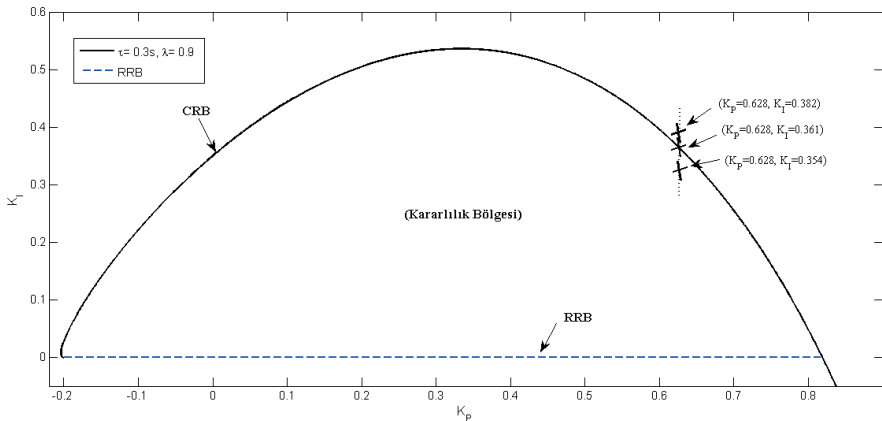
Şekil 2. Jeneratör uyarma kontrol sisteminin simulink modeli

Jeneratör uyarma kontrol sisteminin zaman gecikmesi değeri $\tau = 0.3$ s ve $\lambda = 0.9$ olarak seçilmiştir. Sistemin parametre değerleri kullanılarak oluşturulan karakteristik denklem aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

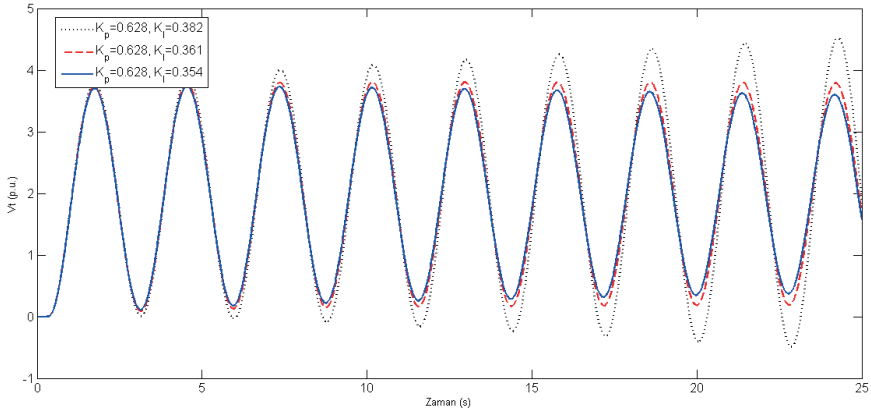
$$\begin{aligned} \Delta(j\omega, \lambda, \tau) = & 0.002\omega^{4.9} \cos\left(\frac{(4.9)\pi}{2}\right) + 0.067\omega^{3.9} \cos\left(\frac{(3.9)\pi}{2}\right) \\ & + 0.615\omega^{2.9} \cos\left(\frac{(2.9)\pi}{2}\right) \\ & + 1.55\omega^{1.9} \cos\left(\frac{(1.9)\pi}{2}\right) + \omega^{0.9} \cos\left(\frac{(0.9)\pi}{2}\right) + \\ & \left(K_P \left(5\omega^{0.9} \cos(0.3\omega) \cos\left(\frac{0.9\pi}{2}\right) + 5\omega^{0.9} \sin(0.3\omega) \sin\left(\frac{0.9\pi}{2}\right) \right) + \right. \\ & \left. K_I(5\cos(0.3\omega)) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
& +j(0.002\omega^{4.9}\sin\left(\frac{(4.9)\pi}{2}\right) + 0.067\omega^{3.9}\sin\left(\frac{(3.9)\pi}{2}\right) \\
& + 0.615\omega^{2.9}\sin\left(\frac{(2.9)\pi}{2}\right) \\
& + 1.55\omega^{1.9}\sin\left(\frac{(1.9)\pi}{2}\right) + \omega^{0.9}\sin\left(\frac{(0.9)\pi}{2}\right) + \\
& \left(K_P\left(-5\omega^\lambda\sin(0.3\omega)\cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) - 5\omega^\lambda\cos(0.3\omega)\sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)\right) + \right. \\
& \left. K_I(-5\sin(0.3\omega))\right)
\end{aligned}$$

Yukarıda elde edilen karakteristik polinoma tanımlanan kararlılık sınır eğrisi yöntemi uygulanabilir. Eşitlik 8.'de kesir dereceli PI denetleyici kazançlarının hesaplanması için $\omega \in [0, 1.011] \text{ rad/s}$ aralığında kullanılmıştır. Eşitlik 8. Belirtilen değerler ile çözüldüğünde Şekil 3'de gösterildiği gibi (K_P, K_I) denetleyici parametre düzleminde bir kararlılık bölgesi hesaplanmıştır. Burada, Eşitlik 8. kullanılarak CRB eğrisi ve RRB doğrusu çizdirilmiştir. Kararlılık bölgesinin doğruluğunu göstermek için CRB eğrisinin üzerinden, dışından ve içinden üç nokta seçilmiş ve benzetim çalışması yapılmış ve sonuçlar Şekil 4'de gösterilmiştir. Üzerinden seçilen noktada $(K_P = 0.628, K_I = 0.361)$ sistemin marjinal kararlılığı doğrulayan sürekli salınımların meydana geldiği açıktır. İçinden seçilen noktada $(K_P = 0.628, K_I = 0.354)$ ise salınımların sönümlendiği ve sisteminin kararlı olduğu görülmektedir. Dışından seçilen $(K_P = 0.628, K_I = 0.382)$ noktada ise kararsız bir çalışmayı gösteren artan salınımlara sahiptir ve sistem kararsız olmaktadır.



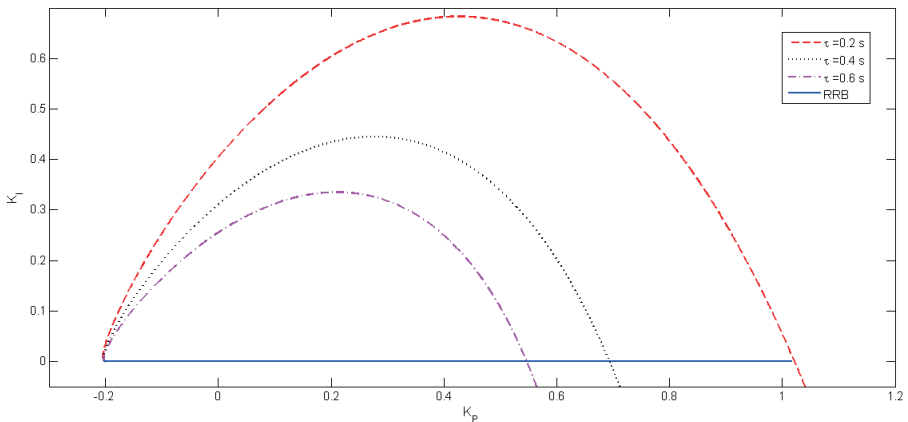
Şekil 3. Jeneratör uyarma kontrol sisteminin kararlılık sınır eğrileri



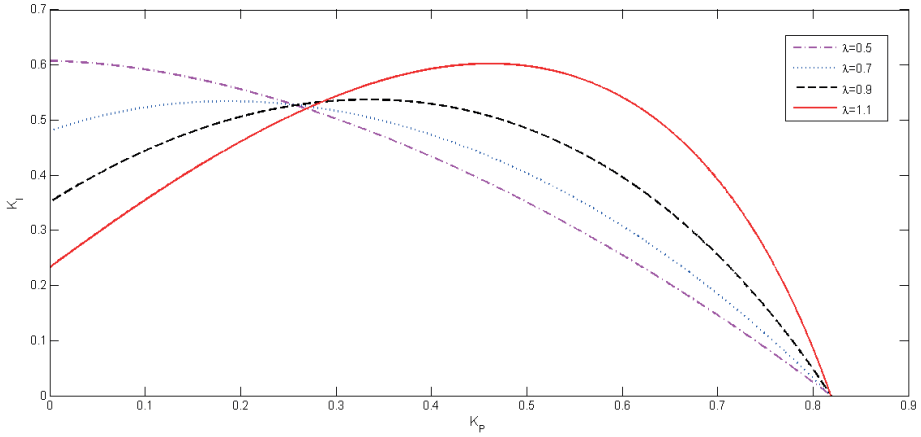
Şekil 4. Jeneratör uyarma kontrol sisteminin gerilim tepkileri

Değerler sabit tutulup yaşanan zaman gecikmesi değerinin kararlılık bölgesi üzerindeki tepkisini incelemek için $\tau=0.2$ s, $\tau=0.4$ s, $\tau=0.6$ s gecikme durumları için sistemin kararlılık bölgeleri Şekil 5’de elde edilmiştir. Şekil 5’den görüldüğü gibi, zaman gecikmesi değeri azaldıkça kararlılık bölgelerinin genişlediği ve sistemin kararlılık sınırını olumlu olarak etkilediğini göstermektedir.

Ayrıca kesir derecesinin sistemin kararlılık bölgeleri üzerindeki etkisini incelemek için zaman gecikmesi değeri sabit tutulup kesir derecesi değeri $\lambda = 0.5, \lambda = 0.7, \lambda = 0.9, \lambda = 1.1$ olarak değiştirilmiş ve Şekil 6’de gösterilmiştir. Kesir derecesi değeri değeri değiştirilerek sistemin daha esnek kullanılması sağlanmıştır.



Şekil 5. Zaman gecikmesi değerlerinin jeneratör uyarma kontrol sisteminin kararlılık bölgesi üzerindeki etkisi



Şekil 6. Kesir derecesi değerlerinin farklı değerleri için kararlılık bölgeleri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, zaman gecikmeli içeren jeneratör uyarma kontrol sisteminin kesir dereceli PI denetleyici parametre uzayında kararlılık bölgelerinin bulunması için kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanılmış ve sonuçların MATLAB/Simulink programı kullanılarak doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Sistemdeki tüm değerler sabit tutulup kararlılık bölgesi üzerindeki zaman gecikmesi değerinin etkisi incelendiğinde zaman gecikmesi değeri azaldığında sistemin kararlılığını sağlayan daha geniş bir aralıkta PI denetleyici kazanç seti ile çalışma imkanı sağlamaktadır. Ayrıca kesir derecesi değerinin kararlılık bölgeleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve kesir dereceli PI denetleyici kullanmanın sistemin sistemin esnekliğinin arttırdığı ve daha iyi bir kararlılık performansı sağladığı görülmüştür.

KAYNAKÇA

- [1] Kundur, P. (1994). „Power System Stability and Control” McGraw.
- [2] Kundur, P. S., Balu, N. J., & Lauby, M. G. (2017). Power system dynamics and stability. *Power system stability and control*, 3, 827-950.
- [3] Xie, X., Xin, Y., Xiao, J., Wu, J., & Han, Y. (2006). WAMS applications in Chinese power systems. *IEEE Power and Energy Magazine*, 4(1), 54-63.
- [4] Prakash, T., Singh, V. P., & Mohanty, S. R. (2019). A synchrophasor measurement based wide-area power system stabilizer design for inter-area oscillation damping considering variable time-delays. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 105, 131-141.
- [5] Ayasun, S., & Gelen, A. (2010). Stability analysis of a generator excitation control system with time delays. *Electrical Engineering*, 91, 347-355.
- [6] Ayasun, S., Eminoğlu, U., & Sönmez, Ş. (2014). Computation of stability delay margin of time-delayed generator excitation control system with a stabilizing transformer. *Mathematical problems in Engineering*, 2014.
- [7] Ramakrishnan, K., & Jawahar, A. Delay-Dependent Stability of Load Frequency Control in Networked Power Systems Integrated with Electric Vehicles. *System*, 1, 1.
- [8] Ayasun, S., Eminoğlu, U., & Sönmez, Ş. (2014). Computation of stability delay margin of time-delayed generator excitation control system with a stabilizing transformer. *Mathematical problems in Engineering*, 2014.
- [9] Erol, H. (2020). Delay margin computation of generator excitation control system by using fractional order controller. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 42(13), 2465-2474.
- [10] Hasen, S., Aydın, Ö., Ayasun, S., & Sönmez, Ş. (2023). The Effect of Virtual Inertia and Damping Control on the Stability Region of Load Frequency Control Systems with Time Delays. *Electric Power Components and Systems*, 51(5), 438-451.
- [11] Gürşahbaz, O. Ö., & Ayasun, S. Zaman Gecikmeli Jeneratör Uyarım Kontrol Sisteminin Kharitonov Yöntemi ile Gürbüz Kararlılık Analizi Robust Stability Analysis of Generator Excitation Control System with Time Delay using Kharitonov Method.

- [12] Alomoush, M. I. (2010). Load frequency control and automatic generation control using fractional-order controllers. *Electrical Engineering*, 91(7), 357-368.
- [13] Söylemez, M. T., Munro, N., & Baki, H. (2003). Fast calculation of stabilizing PID controllers. *Automatica*, 39(1), 121-126.
- [14] Tan, N., Kaya, I., Yeroglu, C., & Atherton, D. P. (2006). Computation of stabilizing PI and PID controllers using the stability boundary locus. *Energy Conversion and management*, 47(18-19), 3045-3058.
- [15] Katipoğlu, D. (2022). Kesir dereceli PI denetleyici ve dinamik talep cevabı içeren zaman gecikmeli bir bölgesel yük frekans kontrol sistemlerinin kararlılık bölgelerinin belirlenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(3), 1468-1476.
- [16] SÖNMEZ, Ş. (2019). Computation of stability regions for load frequency control systems including incommensurate time delays. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27(6), 4596-4607.
- [17] Simulink, Simulation and Model-Based Design, Natick, MathWorks, MA, USA, 2019.
- [18] Ramakrishnan, K. (2016). Delay-dependent stability of networked generator-excitation control systems: An LMI based approach. *IFAC-PapersOnLine*, 49(1), 431-436.
- [19] Sharma, J., Hote, Y. V., & Prasad, R. (2019). PID controller design for interval load frequency control system with communication time delay. *Control Engineering Practice*, 89, 154-168.
- [20] Bhowmik, S., Tomsovic, K., & Bose, A. (2004). Communication models for third party load frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(1), 543-548.

Bölüm 20

GIDA ENDÜSTRİSİNDE MİKROBİYAL ENZİMLER

Ayhan BAŞTÜRK¹

Seval ANDIÇ²

1 Doç. Dr., Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği
Bölümü Van-Türkiye, e-posta: ayhanbasturk@yyu.edu.tr (ORCID ID: 0000-
0001-7701-09306)

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

Enzimler, iyi tanımlanmış bir yoldan çeşitli endojen biyokimyasal reaksiyonların oluşmasına izin veren ideal metabolik katalizörlerdir. Enzimler, kalıcı bir değişime uğramadan reaksiyon aktivasyon enerjisini düşürerek, insan yaşamının sürdürülmesinde çok önemli olan çeşitli biyolojik reaksiyonları hızlandırır (Singh ve ark., 2019). Bitkisel ve hayvansal kaynaklı enzimlere göre katalitik aktiviteleri daha yüksek olan mikrobiyal enzimler, genellikle mikroorganizmalardan elde edilirler. Mikroorganizmalardan enzim üretimi, kolay kullanım, kontrollü koşullar altında hızlı çoğalma, kolay genetik manipülasyon, yüksek üretim verimi gibi birçok avantaj sunar. Ayrıca mikrobiyal enzimlerin endüstriyel kullanımı, katalitik aktiviteleri, özgüllükleri, kararlılıkları, toksik olmamaları, çevre dostu yapıları, maliyet etkinlikleri, üretim kolaylıkları ve benzeri sebeplerden dolayı daha fazla ilgi görmektedir. Çeşitli moleküler teknikler kullanılarak, verimi ve performansı artırılan mikrobiyal enzimler, gıda, ilaç, tekstil, kâğıt, deri ve biyoteknolojik olmak üzere birçok endüstri alanında kullanılmaktadır (Nigam, 2013). Mikrobiyal enzimler, bitki ve hayvan enzimlerinden daha kararlı oldukları için gıda endüstrisinde önemli bir rol oynamaktadır. Amilazlar, proteazlar, lipazlar veya ksilanazlar gibi enzimler gıda sektörlerinde geniş uygulamalara sahiptir (Raveendran ve ark., 2018).

Dünya nüfusunun artışına bağlı olarak gıda talebi de hızlı bir şekilde artmaktadır. Kaliteli ve yeterli gıda arzı sorunu, gıda endüstrisinde enzimlerin uygulanmasıyla çözülebilir (Singh ve ark., 2016). Bu biyomoleküller, gıda üretiminde, gıdaların lezzet, aroma, renk, doku, görünüm ve besin değeri gibi özelliklerinin geliştirilmesinde etkin bir şekilde yer alır (Neidleman, 1984). Mikrobiyal enzimlerin gıda imalatı ve içecek endüstrisindeki rolünün derinlemesine anlaşılması, daha güvenli ve daha kaliteli ürünlerle daha iyi pazarlar sağlamak için temel süreçleri iyileştirmiştir. Ayrıca enzimler, yağ modifikasyonu ve tatlandırıcı teknolojisi gibi yeni alanlarda ilgi kazanmıştır (Li ve ark., 2012). İçecek ve gıda endüstrisinde, mayalama sürecini kontrol altında tutmada, yüksek kaliteli bira üretiminde, geliştirilmiş renk ve aroma ile daha yüksek meyve suyu verimi elde etmede, proteinlerin enzimatik hidrolizi ile hayvan ve sebze proteinlerinin fonksiyonel ve besleyici özelliklerini geliştirmede mikrobiyal enzimlerden yararlanılmaktadır (Singh ve ark., 2016). Mikrobiyal enzimlerin gıda endüstrisindeki uygulamaları fırıncılık, süt ürünleri, meyve suyu üretimi ve biracılık gibi farklı sektörlerle ayrılmıştır. Dünya çapında mikrobiyal enzimler, gıda endüstrisindeki başlıca uygulama pazarı olan fırıncılıkta hamur stabilitesini, kırıntı yumuşaklığını ve yapısını ve ürünlerin raf ömrünü iyileştirmek için verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Mikrobiyal enzimlerin peynir işlemede artan kullanımı, enzimlerin içecek endüstrisinden sonra ikinci en büyük uygulama endüstrisi olan süt endüstrisinde kullanılmasından büyük ölçüde sorumludur (Singh ve ark., 2016).

Mikrobiyal enzimler, endüstriyel ölçekte çeşitli biyoproseslerin geliştirilmesinde büyük önem taşımaktadır. Mikrobiyal enzimlerin gıda ve içecek endüstrilerindeki uygulamaları Tablo 1'de özetlenmiştir. Gıda endüstrisi açısından önemli bazı mikrobiyal enzimler aşağıdaki bölümlerde tartışılmaktadır.

1. OKSİDOREDÜKTAZLAR

Oksidoredüktazlar oksidasyon/redüksiyon reaksiyonlarını katalize eder. Bu enzim sınıfı, dehidrogenazları (hidrit transferi), oksidazları (moleküler oksijene elektron transferi), peroksidazları (peroksidaza elektron transferi) ve oksijenazları (moleküler oksijenden oksijen transferi) içerir (Singh ve ark., 2019). Glikoz oksidaz, peroksidazlar ve lakkazlar bu sınıfa ait önemli enzimlerdir.

1.1. Glikoz Oksidaz

Tablo 1. Mikrobiyal Enzimler ve Gıda Endüstrisindeki Uygulamaları

Enzim	Uygulamaları (Gıda Endüstrisi)	Kaynak
Amilazlar	Nişasta endüstrisi (sıvılaştırma işleminde), gıda endüstrisi (meyve sularının berraklaştırılması için glikoz, maltoz, mısır ve çikolata şurupları üretimi), bira endüstrisi (nişasta işleme) ve fırıncılık endüstrisi (koruma maddesi)	(John, 2017; Sivaramakrishnan ve ark., 2006)
L-Asparaginaz	Kızarmış nişastalı gıdalarda akrilamid azaltımı için	(Pandey ve ark., 2016)
Aspartaz	Aspartik asit ve fumarik asit üretmek için	(Papierz ve ark., 2007; Ram ve Yadav, 2012b)
Selülazlar	Gıda endüstrisi (meyve sularının artırılması, zeytinyağı ekstraksiyonu, tek hücreli proteinler), fırıncılık endüstrisi (unlu mamullerin kalitesinin iyileştirilmesi)	(Saranraj ve ark., 2012; Zhang ve Zhang, 2013)
Glikoz izomeraz	Yüksek fruktozlu mısır şurubu üretimi	(Shakoor ve ark., 2018)
Glikoz oksidaz	Gıda endüstrisi (glukonik asit üretimi), fırıncılık endüstrisi (ekmek kalitesinin iyileştirilmesi), bira endüstrisi (koruyucu madde olarak) ve biyosensörlerde kullanılır.	(Dubey ve ark., 2017; Steffolani ve ark., 2010)
İnulinazlar	Yüksek fruktoz şurubu ve fruktooligosakkaritlerin üretimi	(Singh, Chauhan, ve Kennedy, 2017; Singh ve Chauhan, 2018)
İnvertazlar	İnvert şurup ve suni bal üretimi	(Nadeem ve ark., 2015)
Laktazlar	Galaktooligosakkaritler ve laktoz hidrolize süt ürünleri üretimi	(Sitanggang ve ark., 2016)
Lipazlar	Gıda endüstrisi (lezzet arttırıcı), süt endüstrisi (tereyağı, katı yağlar, sıvı yağlar, kremler vb. üretimi)	(Hasan ve ark., 2006; Pandey ve ark., 1999)
Naringinaz	Narenciye sularının acılığının alınması, naringin ekstraksiyonu	(Puri ve ark., 2011)
Pektinazlar	Çay ve kahve fermantasyonu, meyve sularının durultulması ve renk arttırıcı	(Sharma ve ark., 2013)

Fitazlar	Fırıncılık endüstrisi (ekmek kalitesini iyileştirmek), hayvan yemi endüstrisi (hayvan yeminin sindirilebilirliğini arttırmak için)	(Greiner ve Konietzny, 2006)
Proteazlar	Et yumuşatma ve peynir hazırlama, meyve sularının zenginleştirilmesi ve protein açısından zengin diyet hazırlanması	(Adrio ve Demain, 2014; Amore ve Faraco, 2015; Bialkowska ve ark., 2016)
Pullulanazlar	Gıda endüstrisi (glukoz, maltotrioz, panoz ve izopanoz şuruplarının üretimi), fırıncılık endüstrisi (eskileşme önleyici madde) ve bira endüstrisi (düşük kalorili bira üretimi)	(Nisha & Satyanarayana, 2014; Singh ve ark., 2010)
Tanazlar	Hazır çay üretimi	(van de Lagemaat ve Pyle, 2001; Zhang ve ark., 2015)
Ksilanazlar	Meyve ve sebze sularının arıtılması	(Sharma ve Sharma, 2017)

Glikoz oksidaz (GOD; β -D-glucose: oxygen 1-oxidoreductase; glukoz aerodehidrojenaz; E.C. 1.1.3.4.) çok önemli bir oksidoredüktaz enzimidir (flavoprotein) (Dubey ve ark., 2017). Aynı anda hidrojen peroksit üretimi ile bir elektron alıcısı olarak atomik oksijeni kullanarak glikozun glukono- δ -laktone oksidasyonunu katalize eder. Glukono- δ -laktone daha sonra laktoneazlar tarafından glukonik asit hidrolize edilirken, üretilen hidrojen peroksit katalazlar tarafından oksijen ve suya parçalanır (Leskovac ve ark., 2005). Glikoz oksidaz, bir kofaktör flavin adenin dinükleotidi ile aktif bir bölgede iki özdeş alt birimden (80 kDa) oluşan bir holoenzimdir. Kataliz sırasında, bu özdeş alt birimler redoks taşıyıcıları olarak işlev görür. Glikoz oksidazın yüksek özgülüğü nedeniyle, diğer glikoz oksitleyici enzimlere göre oldukça tercih edilir (Dubey ve ark., 2017).

Glikoz oksidaz bitkiler, hayvanlar, turuncgiller, kırmızı algler, bakteriler ve mantarlar gibi çeşitli kaynaklardan elde edilebilir. Bunlar arasında mantarlar seçkin bir konuma sahiptir ve 1950'den beri endüstriyel uygulamalar için tercih edilmektedir (Fiedurek ve Gromada, 1997). *Aspergillus sp.* ve *Penicillium sp.* dahil olmak üzere mantar türleri, metabolik çok yönlülükleri ve GRAS (genel olarak güvenli olarak kabul edilir) statüleri nedeniyle temel olarak biyoteknolojik ürünlerin endüstriyel üretiminde kullanılmaktadır (Bankar ve ark., 2009). *Aspergillus tubingensis* (Kriaa ve Kammoun, 2016), *A. oryzae* (Gunasundari, 2014), *A. carbonarius* (Yang ve ark., 2014), *A. flavus* (Bhat ve ark., 2013) ve *A. niger* (Liu ve ark., 2001) aspergilli'yi üreten etkili glikoz oksidaz üreten aspergiller olarak, *Penicillium notatum* (Nandy, 2016), *P. funiculosum* (Esmailpour ve ark., 2015), *P. amagasakiense* (Todde ve ark., 2014), *P. variable* (Crognale ve ark., 2008) ve *P. fellutanum* (Manivannan ve Kathiresan, 2007) güçlü glikoz oksidaz üreten penisiller olarak rapor edilmiştir. Bu nedenle, dünya çapındaki araştırmacılar, çok sayıda ticari uygulaması nedeniyle mantar glikoz oksidaz ile ilgilenmektedir (Singh ve ark., 2019).

Glikoz oksidaz birçok yeni uygulamaya sahiptir ve farklı endüstriyel işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca uygulamalarından biri, yakıcılık kontrolörü ve renk dengeleyici olarak kullanılan glukonik asit üretimidir. Ekmek

ve içeceklerde antioksidan ve şelatlama operatörü olarak, peynir pıhtısı oluşumunda ve süt taşının önlenmesinde kullanılmakta; aynı zamanda güçlü bir antioksidandır. Ayrıca, glukonik asidin metal türevli tuzları, gıda maddelerindeki acılığı gidermede kullanılan sodyum glukonat (Pal ve ark., 2016), cilt ve soğuk algnlığı tedavisinde, döküntüler ve zihinsel uyuşukluk ve gecikmiş cinsel olgunlaşma ile ilişkili çinko eksikliğinde (Dubey ve ark., 2017) kullanılan çinko glukonat gibi ilaçların sentezinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Glikoz oksidaz fırıncılık endüstrisinde, daha iyi kalite ve hacimde ekmek üretiminde (Steffolani ve ark., 2010) kullanılırken, içecek endüstrisinde bira ve şarap imalatında kullanılır. Ayrıca, glikoz oksidaz raf ömrünü uzatmak için gıdalardan kalan glikoz ve oksijeni uzaklaştırmak için etkili bir şekilde kullanılmıştır (Zia ve ark., 2012).

1.2. Peroksidazlar

Peroksidazlar (E.C. 1.11.1.7), çeşitli bileşikleri bir serbest radikal mekanizması aracılığıyla oksitlenmiş veya polimerize edilmiş ürünlere dönüştüren oksidoredüktazlardır. Özellikle peroksidaz aktivitesi ferrisiyanürlere ve askorbik asite elektron bağışlayarak onları zararsız bileşenlere ayırmayı içerir (Singh ve ark., 2019). Peroksidazlar, atık sudaki fenol, kresol ve klorlu fenolik bileşiklerin biyoremediasyonu ile su kirliliğini azaltma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, kirleticilerin peroksidazlarla biyotransformasyonuna, biyolojik aktivitelerinin kaybı ve azalan biyoyararlanım nedeniyle toksisite seviyelerinde bir azalma eşlik eder.

Peroksidazlar bitkiler, hayvanlar ve mikroorganizmalar dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan elde edilmektedir (Hamid ve Khalil-ur-Rehman, 2009). Peroksidaz üretimi için yabanturpu (*Armoracia rusticana*) (Kim ve Yoo, 1996), papaya (*Carica papaya*), muz (*Musa paradisiaca*), hazanbel ya da eğir kökü (*Acorus calamus*) ve benzeri gibi çeşitli bitki kaynakları rapor edilmiştir (Singh ve ark., 2019). Bakteri suşları arasında, *Escherichia coli* (Di Genaro ve ark., 2014), *Bacillus sp.* (Bansal ve Kanwar, 2013) ve *Pseudomonas sp.* (Telke ve ark., 2010) baskın peroksidaz üreticileridir. Mantar suşlarından ise, *Thanatephorus sp.* (Sugano ve ark., 2006), *Auricularia sp.* (Liers ve ark., 2010), *Pleurotus ostreatus* (Faraco ve ark., 2007), *Umbelopsis isabellina* ve *Penicillium geastrovirus* (Yang ve ark., 2003) güçlü peroksidaz üreticileri olarak bildirilmiştir. *Candida tropicalis* ve *Debaryomyces polymorphus* gibi mayalardan da peroksidazların elde edildiği rapor edilmiştir (Yang ve ark., 2003).

Peroksidaz, düşük konsantrasyonlarda kromojenik ürünler verme kabiliyeti nedeniyle enzim benzeri immünosorbent assay (ELISA) testlerinde kullanılan enzim konjuge antikörlerin hazırlanması için muhtemelen en uygun enzimdir (Krell, 1991). Peroksidazlar yüksek indirgeme potansiyeli nedeniyle, bir dizi endüstriyel ve analitik biyoproseste kullanılır. Örneğin, lignin peroksidaz ve manganez peroksidaz (Chivukula ve ark., 1995) ve yabanturpu

peroksidazı (Bhunja ve ark., 2001) azo, remazol mavisi, cibacron kırmızısı, remazol parlak mavi ve antrakınon gibi sentetik boyaların bozunmasını sağlar. Peroksidazların önerilen bazı yeni uygulamaları arasında fenolik bileşikler içeren atık suların arıtılması, çeşitli aromatik kimyasalların sentezi ve peroksitin gıda maddeleri ve endüstriyel atıklar gibi malzemelerden uzaklaştırılması yer alır (Agostini ve ark., 2002).

Kâğıt endüstrisinde peroksidazlar ayrıca odun bileşenlerinin lignin ve selüloz hidrolizi ile sırasıyla karbondioksit ve suya parçalanmasında da kullanılır (Regalado ve ark., 2004). Peroksidazlar ayrıca hidrojen peroksit ve organik hidroperoksitler (Jia ve ark., 2002) ve fenolik bileşiklerin (Serra ve ark., 2001) tayini için biyosensörlerin yapımında da kullanılır. Peroksidazların elektrokimya ve biyoelektrokataliz süreçlerinde kullanımı da bildirilmiştir (Zhang ve ark., 2004).

1.3. Lakkazlar

Lakkazlar (E.C. 1.10.3.2), bazı aminler, eterler ve esterler dahil olmak üzere fenolik ve aromatik bileşikleri tek elektronlu bir mekanizma yoluyla oksitleyen fenol oksidazlar grubuna ait fenolü oksitleyen enzimlerdir. Bu çoklu bakır mavi oksidaz, elektron transferini birleştirir ve böylece su moleküllerinin oksidasyonuna neden olur. Geniş substrat özgüllüğü aralığı, son elektron alıcısı olarak oksijen kullanımı ve katalitik aktiviteleri için bir kofaktör veya peroksit gerektirmemesi nedeniyle, lakkazlar çeşitli biyoteknolojik işlemlerde kullanım için potansiyel olarak araştırılmıştır (Singh ve ark., 2019). Bu özellikler, araştırmacıların lakkazların atık suda bulunan bir takım toksik bileşikleri parçalamak için kullanımına olan ilgisini artırmıştır.

Lakkazlar ilk olarak *Rhus vernicifera* ağacından izole edilmiştir (Yoshida, 1883). Şu anda, lakkazlar bitkilerden (mısır tohumları, mango, maş fasulyesi, şeftali, çam vb.), böceklerden (*Bombyx*, *Calliphora*, *Drosophila*, *Manduca*, *Papilio*, *Rhodnius*, *Schistocerca*, *Tenebrio*, vb.) (Kalra ve ark., 2013), ve mikroplardan elde edilebilmektedir. Mikroplar arasında lakkazların çoğu ipliksi mantarlardan izole edilmektedir. En yüksek lakkaz miktarı beyaz çürükçül mantarları tarafından üretilir (Fernandez-Fernandez ve ark., 2013). *Pleurotus florida* (da Silva ve ark., 2012), *P. ostreatus* (Alexandrino ve ark., 2007), *P. pulmonarius* (Tychanowicz ve ark., 2004) ve *P. talandia* (Menezes ve ark., 2009) güçlü lakkaz üreticileridir. Lakkaz üreten diğer mantar türleri arasında *Trametes sp.* (Couto ve Herrera, 2006), *Coriolopsis sp.* (Cabana ve ark., 2007), *Grifola sp.* (Nitheranont ve ark., 2011), *Lentinula sp.* (da Silva ve ark., 2012) vb. yer almaktadır.

Yüksek oksidatif kapasiteleri nedeniyle lakkazlar, gıda, kozmetik, kâğıt, tekstil vb. gibi çeşitli endüstrilerde birçok biyoteknolojik uygulamaya sahiptir. Lakkazlar, yiyecek veya içeceğin renk görünümünü arttırma veya değiştirme gibi belirli eylemler gerçekleştirebilir. Bu şekilde lakkaz, meyve suları, bira ve

şarabın berraklaştırılmasında esmerleşme veya koyulaşma, pus oluşumu ve bulanıklık oluşumundan sorumlu olan istenmeyen fenolik bileşiklerin uzaklaştırılması için kullanılır (Bilal ve ark., 2019). Lakkazlar, bira endüstrisinde stabiliteyi ve raf ömrünü artırmak için kullanılmaktadır. Moleküler oksijen oksidasyon nedeniyle ürün kalitesini olumsuz etkileyebileceğinden, oksijen konsantrasyonunu azaltmak ve ürün ömrünü uzatmak için kullanılabilirler (Brijwani ve ark., 2010). Günümüzde lakkazlar biyopolimerleri çapraz bağlayabildiği için fırıncılık endüstrisinde birçok avantaja sahiptir, bu da viskoziteyi düşürür ve mukavemet stabilitesini arttırır. Ayrıca hamurun işlenebilirliğini ve yapısını iyileştirdiği, unlu mamullerin hacmini artırdığı ve buruşuk pürüzsüzlüğünü geliştirdiği gözlemlenmiştir (Labat ve ark., 2000).

2. HİDROLAZLAR

Bu enzimler, C-O, C-N, O-P, C-C ve diğer tekli bağların hidrolitik ayrılmasını katalize eder. Örneğin, ekzoinülinaz, inülini fruktoz ve glikoza hidrolize eder (Singh ve ark., 2019). Endüstriyel öneme sahip mikrobiyal enzimlerin çoğu bu enzim sınıfına aittir. Bu gruba amilazlar, l-asparaginaz, selülozlar, kitinazlar, inulinazlar, invertazlar, keratinazlar, β -galaktosidazlar, lipazlar, naringinaz, pektinazlar, penisilin asilaz, fitazlar, proteazlar, pullulanazlar, tanaz ve ksilanazlar girmektedir. Bunlardan gıda endüstrisinde en çok kullanılanlarından bazıları aşağıda detaylandırılmıştır.

2.1. Amilazlar

Nişasta hidrolize edici enzimler arasında amilazlar, nişasta işleme endüstrisinde çok önemli bir rol oynar. Nişastadaki α -1,4-glikosidik bağları hidrolize ederler, bu nedenle glikozid hidrolazlar olarak da adlandırılırlar (Balakrishnan ve ark., 2019). Mikrobiyal amilazlar, daha yüksek verim, özgülük, amiloliz üzerinde daha fazla kontrol, üretilen ürünlerin stabilitesi, nötralizasyon adımlarının ortadan kaldırılması ve gelişmiş ekonomi dahil olmak üzere bir dizi avantaj sundukları için nişasta işleme endüstrilerinde nişastanın kimyasal hidrolizinin yerini tamamen almıştır (Balakrishnan ve ark., 2019; Singh ve ark., 2019). Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda iyi çalışarak kontaminasyon ve istenmeyen reaksiyon olasılığını azaltırlar. Amilazlar genel olarak α -amilazlar, β -amilazlar ve glukoamilazlar olarak sınıflandırılır. α -Amilazlar, çeşitli zincir uzunluklarında lineer (glikoz) ve dallı oligosakarit (maltoz) vererek nişasta moleküllerinin hidrolizini rastgele bir şekilde katalize eder. β -amilazlar ve glukoamilazlar ise, art arda daha kısa son ürünler vermek üzere substratı indirgeyici olmayan uçtan hidrolize eder (Lee, 1996).

Amilaz üreten çok çeşitli mikroorganizmalar arasında, bakteriyel enzimler, üretim kolaylığı ve genetik manipülasyon nedeniyle daha çok tercih edilmektedir (Balakrishnan ve ark., 2019). *B. amyloliquefaciens*, *B. cereus*, *B. coagulans*, *B. licheniformis*, *B. polymyxa*, *B. subtilis*, *B. stearothermophilus*, *B. mesentericus*, *B. vulgaris*, *B. megaterium*, *B. Halodurans* ve benzerlerini içeren

Bacillus türlerinin güçlü amilaz üreticileri olduğu rapor edilmiştir (Sumrin ve ark., 2011). Amilazlar üreten diğer mikrobiyal suşlar arasında *Caldimonas taiwanensis*, *Chromohalobacter* sp., *Corynebacterium gigantean*, *Geobacillus thermoleovorans*, *Lactobacillus ferment* ve *Lactobacillus manihotivorans* yer alır (Qureshi ve ark., 2013; Sundarram ve Murthy, 2014). *Bacillus dipsosauri*, *Halobacillus* sp., *Haloarcula hispanica*, *Chromohalobacter* sp. ve *Halomonas meridian* gibi bazı halofil suşlar da amilaz üretebilir. Aspergilli (*Aspergillus oryzae*, *A. niger*, *A. awamori*, *A. fumigates*, *A. kawachii* ve *A. flavus*) ve *Penicillium* sp. (*Penicillium brunneum*, *P. fallutanum*, *P. expansum*, *P. chrysogenum*, *P. roqueforti*, *P. janthinellum*, *P. camemberti* ve *P. olsonii*) güçlü mantar amilaz üreticileri olarak bildirilmiştir (Hussain ve ark., 2013; Sundarram ve Murthy, 2014). Amilazlar, küresel enzim pazarının yaklaşık %30'unu temsil etmektedir. Gıda endüstrisinde amilazlar biracılık ve fırıncılık sektörleri, meyve suları ve nişasta şuruplarının hazırlanması gibi birçok gıda işleme endüstrisinde uygulama alanı bulmaktadırlar (Mobini-Dehkordi ve Javan, 2012). Hamurdaki nişasta, ara ürün nişasta hidrolizi olan a-limit dekstrinlere parçalanabilir; ekmek pişirme sürecinde fermente edilebilir şekerler ile birlikte ve bunların daha fazla fermantasyonu alkol ve CO₂ verir (Prakash ve Jaiswal, 2010). Enzimatik hidroliz, canlı hamurlar ve büyük somun hacimleri üretmek için gereken güçlü maya fermantasyonunu sürdürmek için hamurda yeterince fermente edilebilir şeker sağlar. Esas olarak *A. oryzae*'den elde edilen mantar α -amilazlar genellikle hacmi, rengi ve tadı iyileştirmek için ekmek pişirmede kullanılırken, bakteriyel α -amilazlar daha fazla tatlılık kattığı kek, bisküvi ve kraker hamurlarının hazırlanmasında kullanılır (Dekker, 1994). Nişasta sıvılaştırma işleminde amilazlar kullanılarak nişasta enzimatik hidrolizi, nişastayı fruktoz ve glikoz şuruplarına dönüştürür (Regulapati ve ark., 2007). Çikolata şurubu, kakao bulamaçlarının, içinde çikolata nişastasının dekstrinizasyon yaptığı ve böylece şurubun incelendiği amilazlar ile işlenmesiyle hazırlanır.

2.2. Selülozlar

Selülozlar, selülozik substratların hidrolizinde ve bunların monomerik ürünlere dönüştürülmesinde baskın bir rol oynar. Selülozun β -1,4-glikosidik bağlarını hidrolize ederler ve selülozik malzemeler üzerinde büyümeleri sırasında mikrobiyal suşlar tarafından sentezlenirler (Zhang ve Zhang, 2013). Doğada, tam selüloz hidrolizine üç ana tip selülozün kombinasyonu aracılık eder. Bunlar; endoglukanaz (1,4-D-glukan-4-glukanohidrolaz, E.C. 3.2.1.4), ekzosellobiyohidrolaz (1,4-D-glukan glukohidrolaz, E.C. 3.2.1.74) ve β -glukosidaz (D-glucoside glucohydrolase, E.C. 3.2.1.21)'dir. Endoglukanaz hidrolazlar, selülozik substratların glikosidik bağlarının hidrolizini katalizlerken, ekzoglukanaz (ekzosellobiyohidrolaz) selülozik substratların kristal uçlarına saldırarak selobiyoz verir (Yoon ve ark., 2014). Ayrıca, serbest kalan selobiyoz, β -glukosidazın etkisiyle glikoz moleküllerine dönüştürülür (Wang ve ark.,

2013). Bu enzim bazlı biyodönüşümlerin en büyük avantajı, çoğunlukla selüloz ve hemiselülozlardan (%75-80) oluşan pirinç samanı, manyok kabukları, muz kabukları ve benzeri gibi düşük maliyetli substratların kullanılmasıdır (Saranraj ve ark., 2012). Bu nedenle, dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar, yüksek verim ve spesifikliğe sahip selülaz üretebilen yeni mikroorganizmalarla ilgilenmektedir.

Selülazlar çeşitli mantar, bakteri ve maya suşlarından izole edilmektedir. En iyi karakterize edilen selülaz sistemleri arasında mantarlar, ikincil yolları kullanabildikleri ve daha yüksek selülaz aktivitesi sağlayabildikleri için mikrobiyal gruplar üreten ana selülazlardır. *Aspergillus* ve *Trichoderma* gibi mantar cinsleri iyi bilinen selülaz üreticileridir. *Aspergillus protuberus* (Yadav ve ark., 2016), *A. ellipticus* (Agrawal ve Matkar, 2016), *A. fumigatus* (Das ve ark., 2013), *A. niger* (Pensupa ve ark., 2013) ve benzerlerinin *Aspergillus* üreten etkili selülazlar olduğu rapor edilmiştir. *Trichoderma viride* (Nathan ve ark., 2014) ve *T. asperellum* (Raghuwanshi ve ark., 2014) da güçlü selülaz üreticileri olarak bildirilmiştir. Potansiyel selülaz aktivitesi sergileyen diğer birkaç mantar türü arasında *Penicillium echinulatum* (Camassola ve Dillon, 2014), *Rhizopus oryzae* (Kupski ve ark., 2014) ve *Myceliophthora thermophila* (de Cassia Pereira ve ark., 2015) yer alır. Bakterilerden *Cellulomonas sp.*, *Cellvibrio sp.*, *Microbispora sp.*, *Thermomonospora sp.*, *Clostridium sp.* ve *Ruminococcus sp.* güçlü selüloz üreten cinsler olarak bildirilmektedir (Saranraj ve ark., 2012). Mezofiller, termofiller ve psikrofiller de güçlü selülaz üreticileri olarak bildirilmiştir. Mezofiller, *Hypocrea jecorina*, *A. niger*, *Trichoderma viride*, *T. reesei*, *T. koningii*, *Penicillium pinophilum*, *P. funiculosum*, *Fusarium solani* ve *Sporotrichum pulverulentum* dahil olmak üzere 30°C ile 35°C arasında iyi büyüyebilir. Termofillerden elde edilen selülazlar, 50–90°C'lik yüksek sıcaklık aralığını tolere edebildikleri ve kontaminasyona daha az eğilimli oldukları için endüstriyel prosesler için avantajlıdır. Bu tür ümit verici mikroorganizmaların örnekleri *Thermoanaerobacter sp.*, *Chaetomium thermophilum*, *Humicola insolens*, *Sporotrichum thermophile*, *Thermoascus aurantiacus* ve *Thermotoga maritima*'dır (Gomes ve Steiner, 2004). Yüksek sıcaklığın ürün verimi üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğu biyoproseslerde, *Clostridium sp.* (Akila ve Chandra, 2003) ve *Pseudoalteromonas haloplanktis* (Violot ve ark., 2003), 5–20°C gibi düşük sıcaklık aralığında iyi gelişebildikleri için katalitik dönüşümde baskın bir rol oynarlar.

Selülazlar, ligno-selülozik substratlardan yararlanarak biyoetanol gibi biyoyakıtların üretiminde kullanılır (Saranraj ve ark., 2012). Selülazlar ayrıca gıda endüstrisinde meyve sularının arıtılmasında, zeytinyağı ekstraksiyonunda, şarapların işlenmesinde ve unlu mamullerin kalitesinin iyileştirilmesinde kullanılabilir. Tekstil endüstrisinde denim biyotaşlanması ve selülozik elyafın parlatılması için de kullanılırlar. Selülazlar, kağıt ve kağıt hamuru

endüstrisinde atık kağıdın yeniden kullanımı ve hayvan yeminin sindirilebilirliğinin iyileştirilmesi için kullanılmıştır (Zhang ve Zhang, 2013).

2.3. Lipazlar

Karboksilesterazlar olarak da bilinen lipazlar (E.C. 3.1.1.3), uzun zincirli trigliseritlerin yağ asitleri, diasilgliserol, monoasilgliserol ve gliserole hidrolizini (ve sentezini) katalize ederler (Javed ve ark., 2018). Esterleşme, transesterleşme, interesterleşme, asidoliz, alkoliz ve aminoliz dönüşüm reaksiyonları lipazlar tarafından gerçekleşir (Jiao ve ark., 2018). Geniş bir sıcaklık aralığında optimum aktivite ile geniş substrat spesifikliğine sahiptirler. Bu, lipazları çok yönlü biyokatalizör yapar (Singh ve ark., 2019).

Lipazlar bitkiler, hayvanlar ve mikroorganizmalar arasında yaygın olarak dağılmıştır. Biyoteknolojik uygulamalarda en yaygın kullanılan lipaz kaynağı mikroorganizmalardır. Bakteriler arasında *Bacillus sp.* lipaz üretimi için en iyi potansiyel adaylardır. *B. alcalophilus*, *B. coagulans*, *B. licheniformis*, *B. subtilis*, *B. pumilus* ve *B. stearothermophilus* dahil olmak üzere *Bacillus sp.* en yaygın lipaz üreticileridir (Skoczinski ve ark., 2017). Ek olarak, *Acinetobacter radioresistens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Serratia rubidaea* ve *Staphylococcus caseolyticus*'un da güçlü lipaz üreticileri olduğu bildirilmiştir (Thakur, 2012). Ticari olarak önemli lipaz üreten mantarlar, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Aspergillus* ve *Mucor sp.* cinslerine aittir. *Rhizopus* türleri arasında *Rhizopus arrhizus*, *R. delemar*, *R. oryzae* ve *R. niveus* etkili lipaz üreticileridir (Pandey ve ark., 1999). Diğer lipaz üreten mantar suşları, *Penicillium camembertii*, *P. roquefortii*, *Mucor javanicus*, *M. miehei* ve benzerleridir. Lipaz üreten maya türleri arasında *Candida rugosa*, *C. tropicalis*, *C. antarctica*, *C. cylindracea*, *C. parapsilopsis*, *C. deformans*, *C. curvata*, *C. valida*, *Pichia bispora*, *P. mexicana*, *P. sivecicola*, *P. xylosa*, *P. burtonii*, *Saccharomycopsis crataegenesis*, *Torulaspora globosa* ve *Trichosporon asteroides* sayılabilir (Pandey ve ark., 1999).

Lipazların, çeşitli endüstriyel sektörlerdeki geniş uygulama yelpazesi temelinde en hızlı büyüyen enzimler olduğu tahmin edilmektedir. Mikrobiyal lipazların endüstriyel uygulamaları arasında deterjan işleme (Pettersson ve ark., 2000), kısa zincirli yağ asitleri ve alkollerin esterlerinin sentezi yoluyla tat iyileştirme, rasemik karışımların ve amino asit türevlerinin çözülmesi (Lo Giudice ve ark., 2006) ve ayrıca çeşitli hastalıkların tespiti için teşhis araçları olarak kullanılan biyosensörlerin yapımı yer alır (Hasan ve ark., 2006; Wenk, 2005). Lipazlar süt endüstrisinde, süt yağının hidrolizinde, yağ asidi zincir uzunluklarının değiştirmesinde, peynirlerin olgunlaşmasının hızlandırılmasında, yağ, tereyağı ve kremanın lipolizinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ray, 2012). Gıda işlemede önemli bir yere sahip olan yağların modifikasyonunda da lipazlardan yararlanılmaktadır. Kakao yağı benzeri yağların üretiminde de mikrobiyal lipazlar kullanılır. Bunların dışında lipazlar gıda endüstrisinde biyosensür olarak kullanılmaktadır (Després ve ark., 2009).

Anne sütü yağ ikame maddelerinin üretiminde mikrobiyal lipazlardan yararlanılmaktadır (Sahin ve ark., 2005).

2.4. Proteazlar

Proteinazlar veya proteolitik enzimler olarak da adlandırılan proteazlar, katalitik işlevi proteinlerin peptit bağlarını hidrolize etmek olan hidrolazlar ailesine aittir. Vücudun ihtiyaç duyduğu küçük peptidleri ve amino asitleri üretirler. Hücresel proteinlerin dönüşümüne yardımcı olurlar ve bu özellikler, memeli sindirim enzimleri olan tripsin, kimotripsin ve pepsine benzer. Proteazlar, proteinleri parçalayarak değiştirme yeteneğine sahiptir. Proteazlar, ekzo- ve endopeptidazlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Ekzopeptidazlar, peptit bağını substratın amino veya karboksi terminalinden ayırır. N- veya C-terminalindeki etki bölgelerine göre aminopeptidaz ve karboksipeptidaz olarak sınıflandırılırlar. Endopeptidazlar, substratın dahili peptit bağını ayırırken, aktif bölgede bulunan fonksiyonel gruba göre dört gruba ayrılırlar: serin, aspartik, sistein ve metaloproteazlar.

Proteazlar, tüm canlı organizmalarda bulunan enzimlerdir ve hücre sinyali, farklılaşma, hücre büyümesi ve metabolizması için gereklidir. Mikrobiyal proteazlar, hayvanlardan ve bitki kaynaklarından elde edilen proteazlara göre yüksek ticari değere sahiptir. Bu nedenle, dünya çapındaki araştırmacılar bakteriyel ve fungal proteaz üreten suşlarla ilgilenmektedir. Proteazların çoğu, *B. subtilis* (Pant ve ark., 2015), *B. firmus* (Jaiswal ve ark., 2014), *B. licheniformis* (Banerjee ve ark., 2013), *B. subtilis* (Bhunia ve ark., 2012) ve benzerleri dahil olmak üzere *Bacillus sp.*'den türetilmiştir. Proteaz üreten diğer baskın bakteriyel suşlar arasında *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* (Gandhi ve Shah, 2014), *Microbacterium sp.* (Lu ve ark., 2014), *Pseudomonas stutzeri* (Siti ve Hertadi, 2015) ve *Engyodontium album* (Souza ve ark., 2005) yer almaktadır. Fungal suşlar arasında ağırlıklı olarak *Aspergillus sp.*, baskın proteazları üretir. *Aspergillus flavus* (Negi ve ark., 2011), *A. oryzae* (Leng ve Xu, 2011), *A. sojae* (de Castro ve Sato, 2014) ve *A. niger* (de Castro ve ark., 2015)'in Aspergilli üreten güçlü proteazlar olduğu bildirilmiştir. Proteaz üretme kapasitesine sahip diğer mantar suşları arasında *Entomophthora coronate* (Jisha ve ark., 2013), *Cladosporium herbarum* (Naji ve ark., 2014), *F. solani* (Al-Askar ve ark., 2014) ve *P. chrysogenum* (Sethi ve Gupta, 2015) yer alır.

Proteazların endüstriyel sektörlerde birkaç önemli rolü vardır. Bunlar, deri işleme endüstrilerinde (Jridi ve ark., 2014), peptit üretiminde (Motyan ve ark., 2013), atıkların geri dönüştürülmesinde (Verma ve ark., 2017), atık su arıtmada (Jisha ve ark., 2013), et yumuşatma ve peynir hazırlamada (Verma ve ark., 2017), metioninden zengin protein üretiminde (Wang ve ark., 2016), meyve sularının zenginleştirilmesi ve protein açısından zengin diyetlerin hazırlanması (Amore ve Faraco, 2015), çamaşır deterjanlarının imalatı (Bi-alkowska ve ark., 2016), organik çözücülerde peptit sentezinin katalizinde

(Anbu, 2016) ve iltihaplanma, tümörler, kanser gibi hastalıkların tedavisinde (Kucerova ve Cervinkova, 2016) vb. proseslerde kullanılırlar.

Süt endüstrisinde, özellikle proteolitik aktiviteye sahip zengin bir enzimatik dizi ile karakterize edilen mikrobiyal kültürler, peynir, yoğurt, kefir ve diğer fermente süt ürünleri olarak adlandırılan ürünlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilindiği üzere proteolitik enzimler, peynir yapım sürecinde sadece proteinleri hidrolize etmek için değil aynı zamanda süt proteinlerini pıhtılaştırmak için de kullanılmaktadır. Proteolitik enzimler kullanılarak süttten çeşitli protein hidrolizatları elde edilir. Hasta kişiler ve çocuklar için kolay emilebilen süt ürünleri üretilmektedir. Peynir üretimi için kullanılan ekzojen proteolitik enzimler çok önemlidir (Razzaq ve ark., 2019). Laktik asit bakterileri (LAB) tarafından üretilen bazı mikrobiyal proteazlar, peynir üretiminde kimozinin yerini alabilir (dos Santos Aguilar ve Sato, 2018). LAB ayrıca süttteki alerjenik proteinleri hidrolize edebilen enzimler üretir, dolayısıyla hipoalerjenik süt ürünlerinin üretimi için iyi bir potansiyele sahiptirler (Biscola ve ark., 2018). Proteaz enzimleri etlerde uygun et dokusu, aroması ve rengi oluşumuna yardımcı olur. Proteolitik enzimler sayesinde et yumuşar, hidrasyon derecesi artar ve protein sindirilebilirliği artar (Ojha ve ark., 2019). Proteolitik enzimler, hamurun reolojik özellikleri ve dolayısıyla nihai ürünün kalitesi üzerindeki güçlü etkileri nedeniyle fırıncılık ve makarna endüstrilerinde özellikle önemlidir. Ekşi hamurdaki LAB ve proteolitik enzimleri, hamur pişirme sürecinin iyileştirilmesine, ekmeğin tat ve aromasının iyileştirilmesine, raf ömrünün uzatılmasına ve mayanın hamur geliştirme kapasitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunur (Kumar ve ark., 2019; Sarabhai ve ark., 2021).

2.5. Ksilanazlar

Ksilanazlar, ksilanın β -1,4 glikosidik omurgasını parçalayan önemli bir hidrolitik enzim grubudur (Richhariya ve ark., 2022). Moleküler kütleleri ve izoelektrik noktaları temelinde, ksilanazlar iki gruba ayrılır. Yüksek moleküler ağırlığa ve düşük pI değerlerine sahip bir grup glikanaz ailesi 10'a aitken, düşük moleküler ağırlık ve yüksek pI ksilanazlar glikanaz ailesi 11'de sınıflandırılır. 10 familyasının endoksilanazları, glikosidik bağlara indirgeyici olmayan uca doğru saldırma yeteneğine sahiptir ve ikame edilmiş ksilopiranosil kalıntısına bağlı terminal ksilopiranosil'i serbest bırakırlar. Aile11 ksilanazlar ise esas olarak mantar enzimleri olan I, II ve III olmak üzere üç gruba ayrılır.

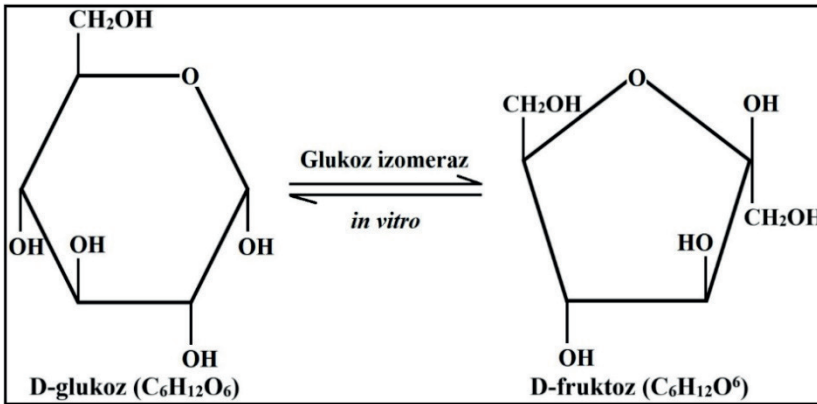
Ksilanazlar mantarlardan, mayalardan, bakterilerden, deniz yosunlarından (Mandal, 2015), tohumlar, kabuklular ve salyangozlardan (Polizeli ve ark., 2005) elde edilir. Mikroplar arasında, bakteri suşları, ksilanaz üretimi için mantar suşlarına göre daha avantajlıdır, çünkü yavaş üretim süreleri, düşük oksijen penetrasyonu ve yüksek viskoziteli polimerlerin ortak üreti-

mi nedeniyle mantarların yetiştirilmesi zordur. Bakteriler arasında, *Bacillus sp.* (*B. circulans*, *B. stearothermophilus*, *B. polymyxa*, *B. subtilis* ve *B. amyloliquifaciens*) ağırlıklı olarak ksilanaz üretimi için kullanılır. *Arthrobacter*, *Cellulomonas*, *Micrococcus*, *Paenibacillus*, *Staphylococcus*, *Thermotoga*, *Microbacterium*, *Pseudoxanthomonas* ve *Rhodococcus* gibi diğer bazı bakteri cinsleri de önemli miktarda ksilanaz üretir. Mantar suşları arasında *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Geotrichum*, *Paecilomyces*, *Cephalosporium* ve *Trichoderma* iyi bilinen ksilanaz üreticileridir. *Streptomyces*, *Thermomonospora* ve *Thermoactinomyces* gibi aktinomisetlerin ksilanaz ürettiği bildirilmiştir (Kumar ve ark., 2017).

Ksilanazlar, çeşitli endüstriyel sektörlerdeki biyoteknolojik potansiyelleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Ksilanazlar esas olarak, hamur fibrilasyonunu iyileştiren kraft hamurlarının ön ağartma işleminde ve geri dönüştürülmüş liflerdeki serbestliği artıran ve odun hamurunun biyo-ağartmasını iyileştiren bağın restorasyonunda kullanılır. Ksilanazlar ayrıca ekmek kalitesinin iyileştirilmesinde (Poldermans ve Schoppink, 1999), hemiselüloz atıklarının arıtılmasında, meyve ve sebze sularının arıtılmasında (Mandal, 2015; Polizeli ve ark., 2005), geviş getiren hayvanların yem sindirilebilirliğinin iyileştirilmesi için yem bitkilerinin ön terbiyesinde (Gilbert ve Hazlewood, 1993), etanol ve ksilitol üretiminde (Juturu ve Wu, 2012) ve keten, kenevir, jüt ve rami gibi sak lifleri zamklarının giderilmesinde (Kumar ve ark., 2017) kullanılır.

3. İZOMERAZLAR

İzomerazlar, cis-trans, ketoenol ve aldoz-ketoz ara dönüşümleri dahil olmak üzere birçok türün moleküler izomerizasyonunu katalize eder. Örneğin, glikoz izomeraz, D-glukozun D-fruktoza izomerizasyonunu taşır (Şekil 1). Glikoz izomeraz, izomerazlardan türetilen ve endüstriyel ölçekte kullanılan önemli bir enzimdir (Singh ve ark., 2019).



Şekil 1. D-glukozun D-fruktoza izomerizasyonu

3.1. Glikoz İzomeraz

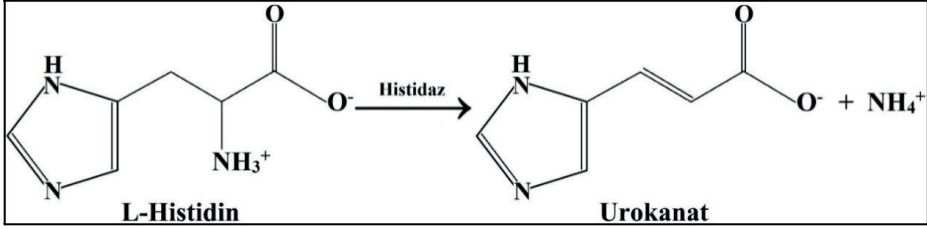
D-glikoz/ksiloz izomeraz veya D-ksiloz ketol izomeraz (E.C. 5.3.1.5) olarak da adlandırılan glikoz izomeraz, amilaz ve proteazdan sonra en yüksek tonaj değerine sahip üçüncü enzimdir (Deshpande ve Rao, 2006). Glikoz ve ksilozun sırasıyla fruktoz ve ksiluloza tersinir izomerizasyonunu katalize eder. Ksilozdan ksiluloza dönüşüm, çürüyen bitki materyalleri üzerinde gelişen saprofitik bakterilerin beslenme gereksinimlerini karşılar ve hemiselülozun etanole biyodönüşümüne yardımcı olur. Glikozun fruktoza dönüşümü kimyasal olarak gerçekleştirilebilse de bu reaksiyon spesifik değildir ve metabolize edilemeyen şekerlerin oluşumuna yol açar. Bu nedenle, yüksek fruktozlu mısır şurubunun (YFMS) endüstriyel üretiminde çok önemli bir rol oynayan glikozun fruktoza glikoz izomeraz katalizli izomerizasyonu tercih edilir. YFMŞ, gıda ve ilaç endüstrilerinde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

Marshall ve Kooi (Marshall ve Kooi, 1957) ilk olarak *Pseudomonas hydrophila*'dan glikoz izomeraz üretimini bildirdiler. O zamandan beri birçok bakteri ve maya suşunun glukoz izomeraz ürettiği rapor edilmiştir. *Brevibacterium sp.*, *Flavobacterium sp.*, *Lactobacillus sp.*, *Micromonospora sp.*, *Nocardia sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Staphylococcus sp.*, (Shakoor ve ark., 2018), *Bacillus sp.* (El-Shora ve ark., 2016), *Streptomyces sp.* (Habeeb ve ark., 2016), *Enterobacter sp.* (Nobel ve ark., 2011) gibi bakteri türleri ve benzerlerinin verimli glikoz izomeraz üreticileri olduğu rapor edilmiştir.

Glikoz izomeraz geniş uygulama yelpazesi nedeniyle, endüstriyel sektörde artan ilgi görmüştür. Gıda endüstrisinde, YFMŞ'nin üretimi için glikoz izomeraz kullanılmaktadır (Singh ve ark., 2018; Sing ve ark., 2017). Fruktoz, düşük sıcaklıkta yüksek çözünürlük, sakarozdan daha düşük kristalleşme eğilimi ve yüksek donma noktası düşüşü gibi faydalı özellikleri nedeniyle, dondurma ve dondurulmuş tatlıların imalatında tat ve dokuyu etkilemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Takasaki, 1980). Fruktoz şurubu, sükröz şurubundan daha yüksek ozmotik basınca sahiptir, bu da onu mikrobiyal saldırılara karşı daha iyi bir koruyucu yapar (Yadav ve Singh, 2014). Düşük maliyetli bir GRAS tatlandırıcısı olarak kullanım alanı gıda ve içecek endüstrilerinden ilaca kadar uzanmaktadır. Fruktoz kandaki glikoz ve insülin seviyesini etkilemez, bu nedenle diyabetik ilaçların üretiminde kullanılır (Shakoor ve ark., 2018). Fruktoz ayrıca ekmek, bisküvi, pasta, çörek, kek vb. şekerleme ürünlerinin üretiminde de kullanılmaktadır (Zargaraan ve ark., 2016). Tıp sektöründe, obezite ve metabolik sendromlardan muzdarip hastalar için sukral (düşük kalorili şeker) üretiminde glikoz izomeraz kullanılmaktadır (Basciano ve ark., 2005). Glikoz izomeraz, hemiselülozik biyokütleden türetilen ksilozun, *Saccharomyces cerevisiae*, *Schizosaccharomyces pombe* ve *Candida tropicalis* gibi geleneksel mayalar tarafından etanole fermente edilebilen ksiluloza izomerizasyonunu katalize edebilir (Chiang ve ark., 1981; Ko ve ark., 2016).

4. LİYAZLAR

Bu enzim grubu, bir grup atomun substrattan çıkarıldığı eliminasyon reaksiyonlarını içerir. Bu, aldolazları, dekarboksilazları, dehidratazları ve bazı pektinazları içerir; ancak hidrolazları içermez. Örneğin histidaz, L-histidin'in ürokanata eliminasyon reaksiyonunu katalize eder (Şekil 2). Aspartaz, liyaz sınıfındaki endüstriyel açıdan en önemli enzimlerden biridir.



Şekil 2. Histidaz katalizli eliminasyon reaksiyonu.

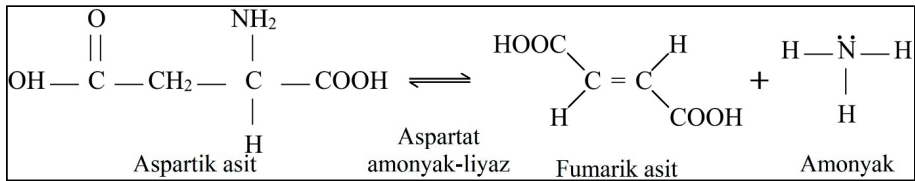
4.1. Aspartaz

Aspartaz (L-aspartat amonyak liyaz, E.C. 4.3.1.1), fumarat ve amonyak üretmek için aspartatın tersine çevrilebilir deaminasyonunu katalize eder. Aspartaz aracılı reaksiyonun yönü, üretim ortamının pH'ına bağlıdır ve alkalik pH'ta, fumarik asit ve amonyaktan L-aspartik asit üretilir (Papierz ve ark., 2007). Aspartaz, iki form arasında pH'a bağlı bir dengeye bulunur. Aspartatın daha yüksek pH formu, iki değerlikli metal iyonları ve substrat analogları tarafından aktive edilirken, aspartatın daha düşük pH formu, katalitik aktivite için herhangi bir efektör gerektirmez. Aspartaz aracılı reaksiyonların denge sabiti, aspartat oluşumunu destekler (Bada ve Miller, 1968).

Aspartaz, doğada hücre içi ve indüklenebilir bir enzimdir. L-Aspartat bu enzim için en etkili indükleyicidir. Aspartaz, L-aspartik asit ile çok spesifik ve verimli bir şekilde reaksiyona girer. Substrat seçiciliği, bu enzimin en dikkat çekici özelliklerinden biridir. Aspartaz tipik bir bakteri enzimi olmasına rağmen, bitki ve hayvan hücrelerinde de varlığı bildirilmiştir (Ram ve Yadav, 2012b). Bakterilerin aspartik asidi süksinik aside indirgeme yeteneğine ilişkin ilk rapor, bakteri hücrelerinde aspartazın varlığını öne sürmüştür (Harden, 1901). Daha sonra *E. coli*'de aspartazın varlığı bildirilmiştir (Quastel ve Woolf, 1926). Virtanen ve Ellfolk (1955), propiyonik asit bakterilerinden ve *Pseudomonas fluorescens*'ten aspartaz aktivitesi bildirdiler. Ayrıca aspartat üreticileri olarak *E. coli*, *Pseudomonas pyocyaneus*, *P. aeruginosa*, *P. vulgaris*, *S. marcescens*, *Propionibacterium sp.*, *Lactobacillus helveticus*, *Diplococcus pneumoniae*, *Micrococcus aureus*, *Sarcina sp.* ve *Salmonella enteritidis*'i bildirilmiştir. *Propionibacterium freudenreichii sp. shermanii* ve *freudenreichii* (Blasco ve ark., 2011)'e ait probiyonik asit bakterilerinde de aspartaz aktivitesi bildirilmiştir. Aspartaz üreten bakteri suşlarının çoğu mezofildir, ancak bir-

kaç termofil ve psikrofil de güçlü aspartaz kaynakları olarak rapor edilmiştir. Termofilik bir *Bacillus sp.*'den aspartaz. YH55-1, sırasıyla *P. fluorescens* ve *E. coli*'den üç ve dört kat daha yüksek spesifik aktivite göstermiştir (Kawata ve ark., 2000). Termotabil aspartaz ayrıca *B. stearothermophilus* KP 1041 (Suzuki ve ark., 1980), *Bacillus aminogenes* T-596 ve *Bacillus thermoaminophilus* T-585'ten (Masunaga ve ark., 1983) bildirilmiştir. Kazuoka ve ark. (2003), Antartika deniz suyundan *Cytophaga sp.* KUC-1'den aspartaz üretimini bildirmiştir. Diğer önemli aspartaz kaynakları *Alkaligenes metalcaligenes* (Vojtšek ve ark., 1986), *Erwinia sp.* (Bagdasaryan ve ark., 2005), *Hafnia alvei* (Wilkinson ve Williams, 1961), *Pseudomonas putida* (Maalej ve ark., 1990), *Rhizobium leguminosarum* (Poole ve ark., 1984) ve *Aeromonas media* (Ram ve Yadav, 2012a, 2013) olarak rapor edilmiştir. Maya ve mantarlar da aspartazların en çok yönlü kaynakları arasındadır. Küfler arasında *Aspergillus glaucus* (Sumiki, 1929), *P. notatum* (Virtanen ve Ellfolk, 1955) ve *R. arrhizus*'un (Riscaldati ve ark., 2000) aspartaz üreticileri olduğu bildirilmiştir. Aspartaz kodlama geni (aspA)'nın, *E. coli* (Zhang ve ark., 1993), *Bacillus sp.* (Kawata ve ark., 2000), *B. subtilis* (Sun ve Setlow, 1991), *Cytophaga sp.* (Kazuoka ve ark., 2003), *P. fluorescens* (Takagi ve ark., 1986), *S. marcescens* (Omori ve ark., 1994) ve *A. media* (R. S. Singh ve Yadav, 2013)'den başarıyla klonlandığı ve rekombinant aspartazların üretiminde kullanıldığı ifade edilmiştir.

Aspartaz, tersinir reaksiyonu katalize ederek, pH koşullarına ve kullanılan substrata bağlı olarak ya fumarik asit ya da aspartik asit üretimiyle sonuçlanır (Şekil 3) (Papierz ve ark., 2007). Her iki ürün de endüstriyel olarak faydalıdır. Aspartik asit ilaçlarda ve gıdalarda kullanılır. Yapay dipeptit tatlandırıcı aspartamın önemli bir bileşenidir. Aspartaz katalizinin diğer bir ürünü olan fumarik asit, gıda endüstrisinde meyve jölelerinde ve konservelelerde kullanılmaktadır. Aspartaz, çözünür veya immobilize formda, aspartik asit üretimi için kullanılabilir (Ram ve Yadav, 2012b). Aspartat üreten *Propionibacterium sp.*, İsviçre peynirlerinin muhafazası için başlangıç kültürü olarak kullanılır. Bu bakteri türü, aspartik asidi, karakteristik bir aroma ve tat veren süksinik aside dönüştürür.



Şekil 3. Aspartaz enzimi ile aspartik asidin, fumarik asit ve amonyaka dönüşüm reaksiyonu.

SONUÇ

Mikroorganizmalar, kontrollü koşullar altında kolay çoğalmaları, kolay genetik manipülasyonları ve yüksek üretim verimleri nedeniyle endüstriyel enzim üretimi için genellikle tercih edilmektedirler. Mikrobiyal enzimlerin endüstriyel kullanım beklentileri günümüzde büyük ölçüde arttı ve artmaya devam etmektedir, çünkü enzimler gıda, yem, içecek, ilaç, deri işleme, deterjan, kâğıt hamuru ve kâğıt ve biyoteknolojik gibi birçok endüstrinin hızla artan nüfusun talebini karşılaması ve doğal kaynakların tükenmesiyle başa çıkması için önemli bir potansiyele sahiptir. Ayrıca bu enzimler, atık yönetiminde ve dolayısıyla yeşil çevrenin geliştirilmesinde önemli bir role sahiptir. Bu nedenle, mikrobiyal enzimlerin yeşil bir çevrenin geliştirilmesinde sunacakları büyük katkı vardır. Çok sayıda mikroorganizma, spesifik reaksiyonları katalize etme potansiyelleri açısından hâlâ taranmamıştır veya incelenmemiştir ve enzimler tarafından katalize edilen reaksiyon bolluğu kesinlikle genişlemeye devam edecektir. Kültürlenmemiş kalan mikroorganizmaları taramak için girişimlerde bulunulmalıdır. Metagenomik ve genomik gibi yeni yaklaşımlar, bilinen enzimlerin yeni kaynaklarının yanı sıra spesifik reaksiyonlar için yeni enzimler bulmak için kullanılmalıdır. Mikroorganizmaların klasik olarak taranmasının potansiyeli, yeni konseptlerle birlikte heyecan verici olanaklar sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Adrio, J. L., ve Demain, A. L. (2014). Microbial enzymes: tools for biotechnological processes. *Biomolecules*, 4(1), 117–139.
- Agostini, E., Hernández-Ruiz, J., Arnao, M. B., Milrad, S. R., Tigier, H. A., ve Acosta, M. (2002). A peroxidase isoenzyme secreted by turnip (*Brassica napus*) hairy-root cultures: inactivation by hydrogen peroxide and application in diagnostic kits. *Biotechnology and applied biochemistry*, 35(1), 1–7.
- Agrawal, D., ve Matkar, K. (2016). Enhancement of cellulase production by substrate manipulation in three *Aspergillus* sp. *Indian J Appl Res*, 6(3).
- Akila, G., ve Chandra, T. S. (2003). A novel cold-tolerant *Clostridium* strain PXYL1 isolated from a psychrophilic cattle manure digester that secretes thermolabile xylanase and cellulase. *FEMS microbiology letters*, 219(1), 63–67.
- Al-Askar, A. A., Abdulkhair, W. M., ve Rashad, Y. (2014). Production, Purification and optimization of protease by *Fusarium solani* under solid state fermentation and isolation of protease inhibitor protein from *Rumex vesicarius* L. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 8(1), 239–250.
- Alexandrino, A. M., Faria, H. G. de, Souza, C. G. M. de, ve Peralta, R. M. (2007). Reutilisation of orange waste for production of lignocellulolytic enzymes by *Pleurotus ostreatus* (Jack: Fr). *Food Science and Technology*, 27, 364–368.
- Amore, A., ve Faraco, V. (2015). Enzymes for food and beverage industries: current situation, challenges and perspectives. *Advances in food biotechnology*, 165–190.
- Anbu, P. (2016). Enhanced production and organic solvent stability of a protease from *Brevibacillus laterosporus* strain PAP04. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 49.
- Bada, J. L., ve Miller, S. L. (1968). Equilibrium constant for the reversible deamination of aspartic acid. *Biochemistry*, 7(10), 3403–3408.
- Bagdasaryan, Z. N., Aleksanyan, G. A., Mirzoyan, A. M., Roseiro, J. C., ve Bagdasaryan, S. N. (2005). Stimulation of *Erwinia* sp. fumarase and aspartase synthesis by changing medium components. *Applied biochemistry and biotechnology*, 125(2), 113–126.
- Balakrishnan, D., Kumar, S., ve Sugathan, S. (2019). Amylases for Food Applications—Updated Information. İçinde S. Negi (Ed.), *Green Bio-processes* (ss. 199–227). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3263-0>
- Banerjee, G., Ray, A. K., Askarian, F., ve Ringø, E. (2013). Characterisation and identification of enzyme-producing autochthonous bacteria from the gastrointestinal tract of two Indian air-breathing fish. *Beneficial Microbes*, 4(3), 277–284.
- Bankar, S. B., Bule, M. V, Singhal, R. S., ve Ananthanarayan, L. (2009). Glucose oxidase—an overview. *Biotechnology advances*, 27(4), 489–501.
- Bansal, N., ve S Kanwar, S. (2013). Purification and characterization of an extracellular

- peroxidase of a bacterial isolate *Bacillus* sp. F31. *Current Biotechnology*, 2(2), 155–161.
- Basciano, H., Federico, L., ve Adeli, K. (2005). Fructose, insulin resistance, and metabolic dyslipidemia. *Nutrition ve metabolism*, 2(1), 1–14.
- Bhat, S. V, Swathi, B. R., Rosy, M., ve Govindappa, M. (2013). Isolation and characterization of glucose oxidase (GOD) from *Aspergillus flavus* and *Penicillium* sp. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2(6), 153–161.
- Bhunia, A., Durani, S., ve Wangikar, P. (2001). Horseradish peroxidase catalyzed degradation of industrially important dyes. *Biotechnology and bioengineering*, 72(5), 562–567.
- Bhunia, B., Basak, B., ve Dey, A. (2012). A review on production of serine alkaline protease by *Bacillus* spp. *Journal of Biochemical Technology*, 3(4), 448–457.
- Białkowska, A., Gromek, E., Florczak, T., Krysiak, J., Szulczewska, K., ve Turkiewicz, M. (2016). Extremophilic Proteases: Developments of Their Special Functions, Potential Resources and Biotechnological Applications BT - Biotechnology of Extremophiles: Advances and Challenges. İçinde P. H. Rampelotto (Ed.), *Biotechnology of Extremophiles*: (ss. 399–444). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13521-2_14
- Bilal, M., Adeel, M., Rasheed, T., Zhao, Y., ve Iqbal, H. M. N. (2019). Emerging contaminants of high concern and their enzyme-assisted biodegradation—a review. *Environment international*, 124, 336–353.
- Biscola, V., Choiset, Y., Rabesona, H., Chobert, J., Haertlé, T., ve Franco, B. (2018). Brazilian artisanal ripened cheeses as sources of proteolytic lactic acid bacteria capable of reducing cow milk allergy. *Journal of applied microbiology*, 125(2), 564–574.
- Blasco, L., Kahala, M., Tupasela, T., ve Joutsjoki, V. (2011). Determination of aspartase activity in dairy *Propionibacterium* strains. *FEMS microbiology letters*, 321(1), 10–13.
- Brijwani, K., Rigdon, A., ve Vadlani, P. V. (2010). Fungal laccases: production, function, and applications in food processing. *Enzyme Research*, 2010.
- Cabana, H., Jones, J. P., ve Agathos, S. N. (2007). Preparation and characterization of cross-linked laccase aggregates and their application to the elimination of endocrine disrupting chemicals. *Journal of Biotechnology*, 132(1), 23–31.
- Camassola, M., ve Dillon, A. J. P. (2014). Effect of different pretreatment of sugar cane bagasse on cellulase and xylanases production by the mutant *Penicillium echinulatum* 9A02S1 grown in submerged culture. *BioMed research international*, 2014.
- Chiang, L.-C., Gong, C.-S., Chen, L.-F., ve Tsao, G. T. (1981). D-Xylulose fermentation to ethanol by *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied and Environmental Microbiology*, 42(2), 284–289.

- Chivukula, M., Spadaro, J. T., ve Renganathan, V. (1995). Lignin peroxidase-catalyzed oxidation of sulfonated azo dyes generates novel sulfophenyl hydroperoxides. *Biochemistry*, 34(23), 7765–7772.
- Couto, S. R., ve Herrera, J. L. T. (2006). Industrial and biotechnological applications of laccases: a review. *Biotechnology advances*, 24(5), 500–513.
- Crognale, S., Petruccioli, M., Fenice, M., ve Federici, F. (2008). Fed-batch gluconic acid production from *Penicillium variabile* P16 under different feeding strategies. *Enzyme and microbial technology*, 42(5), 445–449.
- da Silva, J. J., Santana, T. T., de Oliveira, A. C. C., de Almeida, P. H., de Souza, S. G. H., Linde, G. A., Colauto, N. B., do Valle, J. S., SILVA, J. J. da, ve SANTANA, T. T. (2012). Produção de lacase de fungos basidiomicetos por fermentação submersa com cascas de café. *Arquivos de ciencias veterinarias e zoologia da UNIPAR*, 15(2), 191–196.
- Das, A., Paul, T., Halder, S. K., Jana, A., Maity, C., Mohapatra, P. K. Das, Pati, B. R., ve Mondal, K. C. (2013). Production of cellulolytic enzymes by *Aspergillus fumigatus* ABK9 in wheat bran-rice straw mixed substrate and use of cocktail enzymes for deinking of waste office paper pulp. *Bioresource technology*, 128, 290–296.
- de Cassia Pereira, J., Paganini Marques, N., Rodrigues, A., Brito de Oliveira, T., Boscolo, M., Da Silva, R., Gomes, E., ve Bocchini Martins, D. A. (2015). Thermophilic fungi as new sources for production of cellulases and xylanases with potential use in sugarcane bagasse saccharification. *Journal of applied microbiology*, 118(4), 928–939.
- de Castro, R. J. S., Ohara, A., Nishide, T. G., Albernaz, J. R. M., Soares, M. H., & Sato, H. H. (2015). A new approach for proteases production by *Aspergillus niger* based on the kinetic and thermodynamic parameters of the enzymes obtained. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4(2), 199–207.
- de Castro, R. J. S., ve Sato, H. H. (2014). Protease from *Aspergillus oryzae*: biochemical characterization and application as a potential biocatalyst for production of protein hydrolysates with antioxidant activities. *Journal of Food Processing*, 2014.
- Dekker, R. (1994). Enzymes in food and beverage processing. 1. *Food Australia*, 46(3), 136–139.
- Deshpande, V., ve Rao, M. (2006). *Glucose Isomerase BT - Enzyme Technology* (A. Pandey, C. Webb, C. R. Soccol, ve C. Larroche (ed.); ss. 239–252). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35141-4_12
- Després, J.-P., Ross, R., Boka, G., Alméras, N., ve Lemieux, I. (2009). Effect of rimona-bant on the high-triglyceride/low-HDL-cholesterol dyslipidemia, intraabdominal adiposity, and liver fat: the ADAGIO-Lipids trial. *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology*, 29(3), 416–423.
- Di Gennaro, P., Bargna, A., Bruno, F., ve Sello, G. (2014). Purification of recombinant catalase-peroxidase HPI from *E. coli* and its application in enzymatic poly-me-

- rization reactions. *Applied microbiology and biotechnology*, 98(3), 1119–1126.
- dos Santos Aguilar, J. G., ve Sato, H. H. (2018). Microbial proteases: Production and application in obtaining protein hydrolysates. *Food Research International*, 103, 253–262.
- Dubey, M. K., Zehra, A., Aamir, M., Meena, M., Ahirwal, L., Singh, S., Shukla, S., Upadhyay, R. S., Bueno-Mari, R., ve Bajpai, V. K. (2017). Improvement strategies, cost effective production, and potential applications of fungal glucose oxidase (GOD): current updates. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1032.
- El-Shora, H. M., El-Shobaky, A. M., ve Ghoneim, J. E. (2016). Activity of glucose isomerase from *Bacillus thuringiensis* under different treatments. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5(2), 579–589.
- Esmailpour, Z., Garoosi, G., Haddad, R., ve Heidari Japelaghi, R. (2015). Cloning, Identification and Isolation a Glucose Oxidase Gene (GOX) from *Penicillium funiculosum*. *Cellular and Molecular Researches (Iranian Journal of Biology)*, 27(4), 473–484.
- Faraco, V., Piscitelli, A., Sannia, G., ve Giardina, P. (2007). Identification of a new member of the dye-decolorizing peroxidase family from *Pleurotus ostreatus*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(6), 889–893.
- Fernandez-Fernandez, M., Sanromán, M. Á., ve Moldes, D. (2013). Recent developments and applications of immobilized laccase. *Biotechnology advances*, 31(8), 1808–1825.
- Fiedurek, J., ve Gromada, A. (1997). Selection of biochemical mutants of *Aspergillus niger* with enhanced catalase production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 47(3), 313–316. <https://doi.org/10.1007/s002530050933>
- Gandhi, A., ve Shah, N. P. (2014). Cell growth and proteolytic activity of *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus helveticus*, *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus*, and *Streptococcus thermophilus* in milk as affected by supplementation with peptide fractions. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 65(8), 937–941.
- Gilbert, H. J., ve Hazlewood, G. P. (1993). Bacterial cellulases and xylanases. *Microbiology*, 139(2), 187–194.
- Gomes, J., ve Steiner, W. (2004). The biocatalytic potential of extremophiles and extremozymes. *Food technology and Biotechnology*, 42(4), 223–225.
- Greiner, R., ve Konietzny, U. (2006). Phytase for food application. *Food Technology & Biotechnology*, 44(2).
- Gunasundari, S. (2014). Production of glucose oxidase from *Aspergillus oryzae* by liquid state fermentation for the preservation of food. *Int. J. Ethnomed. Pharmacol. Res*, 2, 51–57.
- Habeeb, S., Yazaji, S., ve Al-Amir, L. (2016). Optimization of glucose isomerase production from *Streptomyces* sp. SH10 using the response surface methodology. *International Food Research Journal*, 23(2), 756–761.

- Hamid, M., ve Khalil-ur-Rehman. (2009). Potential applications of peroxidases. *Food Chemistry*, 115(4), 1177–1186. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.02.035>
- Harden, A. (1901). LXIV.—The chemical action of *Bacillus coli communis* and similar organisms on carbohydrates and allied compounds. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 79, 610–628.
- Hasan, F., Shah, A. A., ve Hameed, A. (2006). Industrial applications of microbial lipases. *Enzyme and Microbial technology*, 39(2), 235–251.
- Hussain, I., Siddique, F., Mahmood, M. S., ve Ahmed, S. I. (2013). A Review of the Microbiological Aspect of α -amylase Production. *International Journal of Agriculture ve Biology*, 15(5).
- Jaiswal, M., Parveda, M., Amareshwari, P., Bhadoriya, S. S., Rathore, P., Yadav, M., Narayisseri, A., ve Nair, A. S. (2014). Identification and characterization of alkaline protease producing *Bacillus firmus* species EMBS023 by 16S rRNA gene sequencing. *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, 6(4), 271–278.
- Javed, S., Azeem, F., Hussain, S., Rasul, I., Siddique, M. H., Riaz, M., Afzal, M., Kouser, A., ve Nadeem, H. (2018). Bacterial lipases: a review on purification and characterization. *Progress in biophysics and molecular biology*, 132, 23–34.
- Jia, J., Wang, B., Wu, A., Cheng, G., Li, Z., & Dong, S. (2002). A method to construct a third-generation horseradish peroxidase biosensor: self-assembling gold nanoparticles to three-dimensional sol-gel network. *Analytical Chemistry*, 74(9), 2217–2223.
- Jiao, Y., Tang, J., Wang, Y., ve Koral, T. L. (2018). Radio-frequency applications for food processing and safety. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9, 105–127.
- Jisha, V. N., Smitha, R. B., Pradeep, S., Sreedevi, S., Unni, K. N., Sajith, S., Priji, P., Josh, M. S., ve Benjamin, S. (2013). Versatility of microbial proteases. *Adv Enzyme Res* 1: 39–51.
- John, J. (2017). Amylases-bioprocess and potential applications: a review. *International Journal of Bioinformatics and Biological Science*, 5(2), 41–50.
- Jridi, M., Lassoued, I., Nasri, R., Ayadi, M. A., Nasri, M., ve Souissi, N. (2014). Characterization and potential use of cuttlefish skin gelatin hydrolysates prepared by different microbial proteases. *BioMed Research International*, 2014.
- Juturu, V., ve Wu, J. C. (2012). Microbial xylanases: engineering, production and industrial applications. *Biotechnology advances*, 30(6), 1219–1227.
- Kalra, K., Chauhan, R., Shavez, M., ve Sachdeva, S. (2013). Isolation of laccase producing *Trichoderma* spp. and effect of pH and temperature on its activity. *Int. J. Chem. Environ. Technol*, 5(5), 2229–2235.
- Kawata, Y., Tamura, K., Kawamura, M., Ikei, K., Mizobata, T., Nagai, J., Fujita, M., Yano, S., Tokushige, M., ve Yumoto, N. (2000). Cloning and over-expression of thermostable *Bacillus* sp. YM55-1 aspartase and site-directed mutagenesis for probing a catalytic residue. *European Journal of Biochemistry*, 267(6), 1847–1857.

- Kazuoka, T., Masuda, Y., Oikawa, T., ve Soda, K. (2003). Thermostable aspartase from a marine psychrophile, *Cytophaga* sp. KUC-1: molecular characterization and primary structure. *Journal of biochemistry*, 133(1), 51–58.
- Kim, Y. H., ve Yoo, Y. J. (1996). Peroxidase production from carrot hairy root cell culture. *Enzyme and Microbial Technology*, 18(7), 531–535.
- Ko, J. K., Um, Y., Woo, H. M., Kim, K. H., ve Lee, S.-M. (2016). Ethanol production from lignocellulosic hydrolysates using engineered *Saccharomyces cerevisiae* harboring xylose isomerase-based pathway. *Bioresource Technology*, 209, 290–296.
- Krell, H. W. (1991). Peroxidase: an important enzyme for diagnostic test kits. *Biochemical, molecular and physiological aspects of plant peroxidases*, 469–478.
- Kriaa, M., ve Kammoun, R. (2016). Producing *Aspergillus tubingensis* CTM507 glucose oxidase by solid state fermentation versus submerged fermentation: process optimization and enzyme stability by an intermediary metabolite in relation with diauxic growth. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 91(5), 1540–1550.
- Kucerova, P., ve Cervinkova, M. (2016). Spontaneous regression of tumour and the role of microbial infection—possibilities for cancer treatment. *Anti-Cancer Drugs*, 27(4), 269–277.
- Kumar, B., Sarabhai, S., ve Prabhasankar, P. (2019). Targeted degradation of gluten proteins in wheat flour by prolyl endoprotease and its utilization in low immunogenic pasta for gluten sensitivity population. *Journal of cereal science*, 87, 59–67.
- Kumar, D., Kumar, S. S., Kumar, J., Kumar, O., Mishra, S. V., Kumar, R., ve Malyan, S. K. (2017). Xylanases and their industrial applications: A review. *Biochemical and Cellular Archives*, 17(1), 353–360.
- Kupski, L., Pagnussatt, F. A., Buffon, J. G., ve Furlong, E. B. (2014). Endoglucanase and total cellulase from newly isolated *Rhizopus oryzae* and *Trichoderma reesei*: production, characterization, and thermal stability. *Applied biochemistry and biotechnology*, 172(1), 458–468.
- Labat, E., Morel, M. H., ve Rouau, X. (2000). Effects of laccase and ferulic acid on wheat flour doughs. *Cereal Chemistry*, 77(6), 823–828.
- Lee, B. (1996). *Fundamentals of Biotechnology*. VCH Publishers, USA, 431p.
- Leng, Y. W., ve Xu, Y. (2011). Improvement of acid protease production by a mixed culture of *Aspergillus niger* and *Aspergillus oryzae* using solid-state fermentation technique. *African Journal of Biotechnology*, 10(35), 6824–6829.
- Leskovac, V., Trivić, S., Wohlfahrt, G., Kandrač, J., ve Peričin, D. (2005). Glucose oxidase from *Aspergillus niger*: the mechanism of action with molecular oxygen, quinones, and one-electron acceptors. *The international journal of biochemistry ve cell biology*, 37(4), 731–750.
- Li, S., Yang, X., Yang, S., Zhu, M., ve Wang, X. (2012). Technology prospecting on en-

zymes: application, marketing and engineering. *Computational and structural biotechnology journal*, 2(3), e201209017.

- Liers, C., Bobeth, C., Pecyna, M., Ullrich, R., ve Hofrichter, M. (2010). DyP-like peroxidases of the jelly fungus *Auricularia auricula-judae* oxidize nonphenolic lignin model compounds and high-redox potential dyes. *Applied microbiology and biotechnology*, 85(6), 1869–1879.
- Liu, J., Huang, Y., Liu, J., Weng, L., ve Ji, L. (2001). Effects of metal ions on simultaneous production of glucose oxidase and catalase by *Aspergillus niger*. *Letters in applied microbiology*, 32(1), 16–19.
- Lo Giudice, A., Michaud, L., De Pascale, D., De Domenico, M., Di Prisco, G., Fani, R., ve Bruni, V. (2006). Lipolytic activity of Antarctic cold-adapted marine bacteria (Terra Nova Bay, Ross Sea). *Journal of Applied Microbiology*, 101(5), 1039–1048.
- Lu, J., Wu, X., Jiang, Y., Cai, X., Huang, L., Yang, Y., Wang, H., Zeng, A., ve Li, A. (2014). An extremophile *Microbacterium* strain and its protease production under alkaline conditions. *Journal of Basic Microbiology*, 54(5), 378–385.
- Maalej, S., Cochet, N., ve Lebeault, J.-M. (1990). Production of *Pseudomonas putida* cells with high aspartase activity. *Biotechnology letters*, 12(8), 557–562.
- Mandal, A. (2015). Review on microbial xylanases and their applications. *Appl Microbiol Biotechnol*, 42, 42–45.
- Manivannan, S., ve Kathiresan, K. (2007). Effect of medium composition on glucose oxidase production by *penicillium fellutanum* isolated from mangrove rhizosphere soil. *Res. J. Microbiol*, 2(3), 294–298.
- Marshall, R. O., ve Kooi, E. R. (1957). Enzymatic conversion of D-glucose to D-fructose. *Science*, 125(3249), 648–649.
- Masunaga, K., Kimura, K., Ado, Y., Kawamoto, T., ve Masunaga, I. (1983). *Thermophilic aspartase, processes for producing, culture used, and L-aspartic acid preparation process using the same*. Elsevier.
- Menezes, C. R., Silva, I. S., ve Durrant, L. R. (2009). Sugarcane bagasse: Source for the production of ligninocellulolytic enzymes. *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, 5, 68–78.
- Mobini-Dehkordi, M., ve Javan, F. A. (2012). Application of alpha-amylase in biotechnology. *J. Biol. Today World*, 1(1), 39–50.
- Motyan, J. A., Toth, F., ve Tozser, J. (2013). Research applications of proteolytic enzymes in molecular biology. *Biomolecules*, 3(4), 923–942.
- Nadeem, H., Rashid, M. H., Siddique, M. H., Azeem, F., Muzammil, S., Javed, M. R., Ali, M. A., Rasul, I., ve Riaz, M. (2015). Microbial invertases: A review on kinetics, thermodynamics, physiochemical properties. *Process Biochemistry*, 50(8), 1202–1210.
- Naji, K. M., Abdullah, Q. Y. M., Al-Zaqri, A. Q. M., ve Alghalibi, S. M. (2014). Evaluating the biodeterioration enzymatic activities of fungal contamination isolated from some ancient yemeni mummies preserved in the national museum. *Bioc-*

hemistry research international, 2014.

- Nandy, S. K. (2016). Bioprocess technology governs enzyme use and production in industrial biotechnology: an overview. *Enz Eng*, 144(5), 1–5.
- Nathan, V. K., Esther Rani, M., Rathinasamy, G., Dhiraviam, K. N., ve Jayavel, S. (2014). *Process optimization and production kinetics for cellulase production by Trichoderma viride VKF3*. Springerplus 3: 92.
- Negi, S., Gupta, S., ve Banerjee, R. (2011). Extraction and purification of glucoamylase and protease produced by *Aspergillus awamori* in a single-stage fermentation. *Food Technology and Biotechnology*, 49(3), 310–315.
- Neidleman, S. L. (1984). Applications of biocatalysis to biotechnology. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 1(1), 1–38.
- Nigam, P. S. (2013). Microbial enzymes with special characteristics for biotechnological applications. *Biomolecules*, 3(3), 597–611.
- Nisha, M., ve Satyanarayana, T. (2014). Characterization and Multiple Applications of a Highly Thermostable and Ca²⁺-Independent Amylopullulanase of the Extreme Thermophile *Geobacillus thermoleovorans*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 174(7), 2594–2615. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1212-8>
- Nitheranont, T., Watanabe, A., ve Asada, Y. (2011). Extracellular laccase produced by an edible basidiomycetous mushroom, *Grifola frondosa*: purification and characterization. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 75(3), 538–543.
- Nobel, R., Pandidurai, S., Kalaichelvan, P. T., Kumar, D. J. M., ve Gnanaraj, M. (2011). Production of extracellular glucose isomerase by *Enterobacter agglomerans* isolated from garden soil. *Int J Curr Res*, 3, 21–25.
- Ojha, B. K., Singh, P. K., ve Shrivastava, N. (2019). *Enzymes in food biotechnology*. Elsevier Amsterdam, The Netherlands:
- Omori, K., Akatsuka, H., ve Komatsubara, S. (1994). Construction of a versatile promoter analysis vector and its use for analysis of the *Serratia marcescens* aspartate promoter region. *Plasmid*, 32(2), 233–237.
- Pal, P., Kumar, R., ve Banerjee, S. (2016). Manufacture of gluconic acid: A review towards process intensification for green production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 104, 160–171.
- Pandey, A., Benjamin, S., Soccol, C. R., Nigam, P., Krieger, N., ve Soccol, V. T. (1999). The realm of microbial lipases in biotechnology. *Biotechnology and applied biochemistry*, 29(2), 119–131.
- Pandey, A., Negi, S., ve Soccol, C. R. (2016). *Current developments in biotechnology and bioengineering: production, isolation and purification of industrial products*. Elsevier.
- Pant, G., Prakash, A., Pavani, J. V. P., Bera, S., Deviram, G., Kumar, A., Panchpuri, M., ve Prasuna, R. G. (2015). Production, optimization and partial purification of protease from *Bacillus subtilis*. *Journal of Taibah University for Science*, 9(1), 50–55.

- Papierz, M., Gadomska, G., Sobierajski, B., ve Chmiel, A. (2007). Selection and activation of *Escherichia coli* strains for L-aspartic acid biosynthesis. *Polish journal of microbiology*, 56(2), 71–76.
- Pensupa, N., Jin, M., Kokolski, M., Archer, D. B., ve Du, C. (2013). A solid state fungal fermentation-based strategy for the hydrolysis of wheat straw. *Bioresource technology*, 149, 261–267.
- Pettersson, A., Adamsson, M., ve Dave, G. (2000). Toxicity and detoxification of Swedish detergents and softener products. *Chemosphere*, 41(10), 1611–1620.
- Poldermans, B., ve Schoppink, P. (1999). Controlling the baking process and product quality with enzymes: The baking industry. *Cereal foods world*, 44(3), 132–135.
- Polizeli, M. de L. T. de M., Rizzatti, A. C. S., Monti, R., Terenzi, H. F., Jorge, J. A., ve Amorim, D. de S. (2005). Xylanases from fungi: properties and industrial applications. *Applied microbiology and biotechnology*, 67, 577–591.
- Poole, P. S., Dilworth, M. J., ve Glenn, A. R. (1984). Acquisition of aspartase activity in *Rhizobium leguminosarum* WU235. *Microbiology*, 130(4), 881–886.
- Prakash, O., ve Jaiswal, N. (2010). α -Amylase: an ideal representative of thermostable enzymes. *Applied biochemistry and biotechnology*, 160(8), 2401–2414.
- Puri, M., Kaur, A., Schwarz, W. H., Singh, S., ve Kennedy, J. F. (2011). Molecular characterization and enzymatic hydrolysis of naringin extracted from kinnow peel waste. *International Journal of Biological Macromolecules*, 48(1), 58–62.
- Quastel, J. H., ve Woolf, B. (1926). The equilibrium between l-aspartic acid, fumaric acid and ammonia in presence of resting bacteria. *Biochemical Journal*, 20(3), 545.
- Qureshi, M. Z., Bashir, T., Khurshid, S., Akhtar, N., Rehman, T., Hussain, G., Rahman, J., ve Khan, M. A. (2013). Antioxidant Potential Profile of Extracts from Different Parts of Stem of *Eucalyptus camaldulensis*. *Asian Journal of Chemistry*, 25(1), 261–265.
- Raghuwanshi, S., Deswal, D., Karp, M., ve Kuhad, R. C. (2014). Bioprocessing of enhanced cellulase production from a mutant of *Trichoderma asperellum* RCK2011 and its application in hydrolysis of cellulose. *Fuel*, 124, 183–189.
- Ram, S., ve Yadav, M. (2012a). Biochemical and molecular characterization of a new aspartase producer *Aeromonas media* NFB-5 from effluent of a fertilizer factory. *Current Biotechnology*, 1(3), 185–193.
- Ram, S., ve Yadav, M. (2012b). Current trends and developments of aspartase. *Current Biotechnology*, 1(2), 135–147.
- Ram, S., ve Yadav, M. (2013). Statistical optimization of media constituents for enhanced production of aspartase from *Aeromonas media* NFB-5. *Current Biotechnology*, 2(1), 30–38.
- Raveendran, S., Parameswaran, B., Ummalya, S. B., Abraham, A., Mathew, A. K., Madhavan, A., Rebello, S., ve Pandey, A. (2018). Applications of microbial enzymes in food industry. *Food Technology and Biotechnology*, 56(1), 16–30. [http://](#)

ps://doi.org/10.17113/ftb.56.01.18.5491

- Ray, A. (2012). Application of lipase in industry. *Asian Journal of Pharmacy and technology*, 2(2), 33–37.
- Razzaq, A., Shamsi, S., Ali, A., Ali, Q., Sajjad, M., Malik, A., ve Ashraf, M. (2019). Microbial proteases applications. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 7(JUN), 110. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00110>
- Regalado, C., García-Almendárez, B. E., ve Duarte-Vázquez, M. A. (2004). Biotechnological applications of peroxidases. *Phytochemistry Reviews*, 3(1), 243–256.
- Regulapati, R., Malav, P. N., ve Gummadi, S. N. (2007). Production of thermostable α -amylases by solid state fermentation-A Review. *American Journal of Food Technology*, 2(1), 1–11.
- Richhariya, J., Sharma, T. K., ve Dassani, S. (2022). Microbial Xylanases: A Review. *Flora and Fauna*, 28(2). <https://doi.org/10.33451/florafaua.v28i2pp231-240>
- Riscaldati, E., Moresi, M., Federici, F., ve Petruccioli, M. (2000). Direct ammonium fumarate production by *Rhizopus arrhizus* under phosphorous limitation. *Biotechnology Letters*, 22(13), 1043–1047.
- Sahin, N., Akoh, C. C., ve Karaali, A. (2005). Lipase-catalyzed acidolysis of tripalmitin with hazelnut oil fatty acids and stearic acid to produce human milk fat substitutes. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(14), 5779–5783.
- Sarabhai, S., Tamilselvan, T., ve Prabhasankar, P. (2021). Role of enzymes for improvement in gluten-free foxtail millet bread: It's effect on quality, textural, rheological and pasting properties. *LWT*, 137, 110365.
- Saranraj, P., Stella, D., ve Reetha, D. (2012). Microbial cellulases and its applications. *International Journal of Biochemistry and Biotechnology Science*, 1, 1–12.
- Serra, B., Benito, B., Agüí, L., Reviejo, A. J., ve Pingarron, J. M. (2001). Graphite-Teflon-Peroxidase Composite Electrochemical Biosensors. A Tool for the Wide Detection of Phenolic Compounds. *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*, 13(8-9), 693–700.
- Sethi, S., ve Gupta, S. (2015). *Optimization of Protease Production from Fungi Isolated from Soil*.
- Shakoor, S., Singh, G., ve Singh, M. (2018). Glucose isomerase production and its application in various field. *Int J Sci Res Sci Technol*, 4, 690–699.
- Sharma, N., Rathore, M., ve Sharma, M. (2013). Microbial pectinase: sources, characterization and applications. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12(1), 45–60.
- Sharma, N., ve Sharma, N. (2017). Microbial xylanases and their industrial applications as well as future perspectives: a review. *Global J. Biol. Agric. Health Sci*, 6(3).
- Singh, R., Kumar, M., Mittal, A., ve Mehta, P. K. (2016). Microbial enzymes: industrial progress in 21st century. *3 Biotech*, 6(2), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0485-8>

- Singh, R. S., ve Chauhan, K. (2018). Production, purification, characterization and applications of fungal inulinases. *Current Biotechnology*, 7(3), 242–260.
- Singh, R. S., Chauhan, K., ve Kennedy, J. F. (2017). A panorama of bacterial inulinases: production, purification, characterization and industrial applications. *International journal of biological macromolecules*, 96, 312–322.
- Singh, R. S., Chauhan, K., ve Singh, R. P. (2017). Enzymatic approaches for the synthesis of high fructose syrup. İçinde *Plant Biotechnology: Recent Advancements and Developments* (ss. 189–211). Springer.
- Singh, R. S., Chauhan, K., ve Singh, R. P. (2018). Trends in enzymatic synthesis of high fructose syrup. İçinde *Technologies in Food Processing* (ss. 81–108). Apple Academic Press Inc. Canada.
- Singh, R. S., Saini, G. K., ve Kennedy, J. F. (2010). Maltotriose syrup preparation from pullulan using pullulanase. *Carbohydrate Polymers*, 80(2), 401–407. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.11.040>
- Singh, R. S., Singh, T., ve Pandey, A. (2019). Microbial enzymes—an overview. İçinde *Advances in Enzyme Technology*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64114-4.00001-7>
- Singh, R. S., ve Yadav, M. (2013). Enhanced production of recombinant aspartase of *Aeromonas media* NFB-5 in a stirred tank reactor. *Bioresource technology*, 145, 217–223.
- Sitanggang, A. B., Drews, A., ve Kraume, M. (2016). Recent advances on prebiotic lactulose production. *World journal of microbiology and biotechnology*, 32, 1–10.
- Siti, S. D., ve Hertadi, R. (2015). Isolation and characterization of organic-solvent stable protease isolated by *Pseudomonas stutzeri* BK AB-12. *Procedia Chemistry*, 16, 341–348.
- Sivaramakrishnan, S., Gangadharan, D., Nampoothiri, K. M., Soccol, C. R., ve Pandey, A. (2006). α -Amylases from microbial sources—an overview on recent developments. *Food Technol Biotechnol*, 44(2), 173–184.
- Skoczinski, P., Volkenborn, K., Fulton, A., Bhadauriya, A., Nutschel, C., Gohlke, H., Knapp, A., ve Jaeger, K.-E. (2017). Contribution of single amino acid and codon substitutions to the production and secretion of a lipase by *Bacillus subtilis*. *Microbial cell factories*, 16, 1–13.
- Souza, V. R. de, Silva, A. C. G., Pinotti, L. M., Araújo, H. S. S., ve Giordano, R. de L. C. (2005). Characterization of the penicillin G acylase from *Bacillus megaterium* ATCC 14945. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 48, 105–111.
- Steffolani, M. E., Ribotta, P. D., Pérez, G. T., ve León, A. E. (2010). Effect of glucose oxidase, transglutaminase, and pentosanase on wheat proteins: Relationship with dough properties and bread-making quality. *Journal of cereal science*, 51(3), 366–373.
- Sugano, Y., Matsushima, Y., ve Shoda, M. (2006). Complete decolorization of the anthraquinone dye Reactive blue 5 by the concerted action of two peroxidases

- from *Thanatephorus cucumeris* Dec 1. *Applied microbiology and biotechnology*, 73(4), 862–871.
- Sumiki, Y. (1929). Studies on the Fermentation Products by Mould Fungi: IV. *Aspergillus Glaucus*. Part I V. *Dematium Pullulans*. *Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan*, 5(1–5), 10–16.
- Sumrin, A., Ahmad, W., Ijaz, B., Sarwar, M. T., Gull, S., Kausar, H., Shahid, I., Jahan, S., Asad, S., ve Hussain, M. (2011). Purification and medium optimization of α -amylase from *Bacillus subtilis* 168. *African Journal of Biotechnology*, 10(11), 2119–2129.
- Sun, D. X., ve Setlow, P. (1991). Cloning, nucleotide sequence, and expression of the *Bacillus subtilis* ans operon, which codes for L-asparaginase and L-aspartase. *Journal of bacteriology*, 173(12), 3831–3845.
- Sundarram, A., ve Murthy, T. P. K. (2014). α -amylase production and applications: a review. *Journal of Applied ve Environmental Microbiology*, 2(4), 166–175.
- Suzuki, Y., Yasui, T., Mino, Y., ve Abe, S. (1980). Production of L-aspartic acid from fumaric acid by a fumaric acid-assimilating obligate thermophile, *Bacillus stearothermophilus* KP 1041. *European journal of applied microbiology and biotechnology*, 11(1), 23–27.
- Takagi, J., Tokushige, M., ve Shimura, Y. (1986). Cloning and nucleotide sequence of the aspartase gene of *Pseudomonas fluorescens*. *The Journal of Biochemistry*, 100(3), 697–705.
- Takasaki, Y. (1980). Glucose Isomerase. İçinde *Journal of Synthetic Organic Chemistry, Japan* (C. 38, Sayı 6). <https://doi.org/10.5059/yukigoseikyokaiishi.38.538>
- Telke, A. A., Joshi, S. M., Jadhav, S. U., Tamboli, D. P., ve Govindwar, S. P. (2010). Decolorization and detoxification of Congo red and textile industry effluent by an isolated bacterium *Pseudomonas* sp. SU-EBT. *Biodegradation*, 21(2), 283–296.
- Thakur, S. (2012). Lipases, its sources, properties and applications: a review. *Int J Sci Eng Res*, 3(7), 1–29.
- Todde, G., Hovmöller, S., Laaksonen, A., ve Mocci, F. (2014). Glucose oxidase from *Penicillium amagasakiense*: Characterization of the transition state of its denaturation from molecular dynamics simulations. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 82(10), 2353–2363.
- Tychanowicz, G. K., Zilly, A., de Souza, C. G. M., ve Peralta, R. M. (2004). Decolourisation of industrial dyes by solid-state cultures of *Pleurotus pulmonarius*. *Process Biochemistry*, 39(7), 855–859.
- van de Lagemaat, J., ve Pyle, D. L. (2001). Solid-state fermentation and bioremediation: development of a continuous process for the production of fungal tannase. *Chemical Engineering Journal*, 84(2), 115–123. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(01\)00196-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1385-8947(01)00196-6)
- Verma, A., Singh, H., Anwar, S., Chattopadhyay, A., Tiwari, K. K., Kaur, S., & Dhilon, G. S. (2017). Microbial keratinases: industrial enzymes with waste manage-

- ment potential. *Critical reviews in biotechnology*, 37(4), 476–491.
- Violot, S., Haser, R., Sonan, G., Georgette, D., Feller, G., ve Aghajari, N. (2003). Expression, purification, crystallization and preliminary X-ray crystallographic studies of a psychrophilic cellulase from *Pseudoalteromonas haloplanktis*. *Acta Crystallographica Section D: Biological Crystallography*, 59(7), 1256–1258.
- Virtanen, A. I., ve Ellfolk, N. (1955). Aspartase. *Methods Enzymol.*, 2, 386–390.
- Vojtšek, V., Guttrann, T., Barta, M., ve Netnral, J. (1986). Preparation of L-aspartic acid by means of immobilized *Alcaligenes metalcaligenes* cells. *Biotechnology and bioengineering*, 28(7), 1072–1079.
- Wang, H., Yang, L., Ping, Y., Bai, Y., Luo, H., Huang, H., ve Yao, B. (2016). Engineering of a *Bacillus amyloliquefaciens* strain with high neutral protease producing capacity and optimization of its fermentation conditions. *PloS one*, 11(1), e0146373.
- Wang, M., Liu, K., Dai, L., Zhang, J., ve Fang, X. (2013). The structural and biochemical basis for cellulose biodegradation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(4), 491–500.
- Wenk, M. R. (2005). The emerging field of lipidomics. *Nature reviews Drug discovery*, 4(7), 594–610.
- Wilkinson, J. S., & Williams, V. R. (1961). Partial purification of bacterial aspartase by starch electrophoresis. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 93(1), 80–84.
- Yadav, A. K., ve Singh, S. V. (2014). Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology*, 51, 1654–1673.
- Yadav, P. S., Shruthi, K., Prasad, B. V. S., ve Chandra, M. S. (2016). Enhanced production of β -glucosidase by new strain *Aspergillus protuberus* on solid state fermentation in rice husk. *Int J Curr Microbiol App Sci*, 5(12), 551–564.
- Yang, L., Lübeck, M., ve Lübeck, P. S. (2014). Deletion of glucose oxidase changes the pattern of organic acid production in *Aspergillus carbonarius*. *AMB Express*, 4(1), 1–9.
- Yang, Q., Yang, M., Pritsch, K., Yediler, A., Hagn, A., Schloter, M., ve Kettrup, A. (2003). Decolorization of synthetic dyes and production of manganese-dependent peroxidase by new fungal isolates. *Biotechnology Letters*, 25(9), 709–713.
- Yoon, L. W., Ang, T. N., Ngoh, G. C., ve Chua, A. S. M. (2014). Fungal solid-state fermentation and various methods of enhancement in cellulase production. *Bio-mass and bioenergy*, 67, 319–338.
- Yoshida, H. (1883). LXIII.—chemistry of lacquer (Urushi). Part I. communication from the chemical society of Tokio. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 43, 472–486.
- Zargaraan, A., Kamaliroosta, L., Yaghoubi, A. S., ve Mirmoghtadaie, L. (2016). Effect of substitution of sugar by high fructose corn syrup on the physicochemical properties of bakery and dairy products: a review. *Nutrition and Food Sciences Research*, 3(4), 3–11.

- Zhang, H. Y., Zhang, J., Lin, L., Du, W. Y., ve Lu, J. (1993). Enhancement of the stability and activity of aspartase by random and site-directed mutagenesis. *Biochemical and biophysical research communications*, 192(1), 15–21.
- Zhang, S., Gao, X., He, L., Qiu, Y., Zhu, H., ve Cao, Y. (2015). Novel trends for use of microbial tannases. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 45(3), 221–232.
- Zhang, X., ve Zhang, Y. P. (2013). Cellulases: characteristics, sources, production, and applications. İçinde *Bioprocessing technologies in biorefinery for sustainable production of fuels, chemicals, and polymers* (ss. 131–146). Wiley Online Library.
- Zhang, Y., He, P., ve Hu, N. (2004). Horseradish peroxidase immobilized in TiO₂ nanoparticle films on pyrolytic graphite electrodes: direct electrochemistry and bioelectrocatalysis. *Electrochimica Acta*, 49(12), 1981–1988.
- Zia, M. A., Ain, Q., Iftikhar, T., Abbas, R. Z., & Rahman, K. (2012). Production of rabbit antibodies against purified Glucose oxidase. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 55, 69–74.

Bölüm 21

ULAŞTIRMA PLANLAMASINDA KUYRUK TEORİSİ İÇİN ÜSTEL SERVİS ZAMANLI MODELLERİN ÖRNEK ÜZERİNDEN KIYASLANMASI

Kemal Muhammet ERTEN¹

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Yalvaç Teknik Bilimler
Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü Yalvaç, Türkiye
ertenkemal@windowslive.com
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5181-4109>



1. Giriş

Kuyruk teorisi, 1900'lü yılların başlarında Karl Erlang'ın telefon santrali verimliliği konusundaki çalışmasıyla ortaya çıkmış (Yang ve Yang, 2014; Ekeocha ve Ihebom, 2018) bekleme hatlarının matematiksel olarak incelenmesini içeren bir yaklaşımdır (Esmer ve Elmalı, 2021; Modi vd., 2019; Albayın, 2019).

Kuyruğa katılım, bekleme, hizmet alımı ve ayrılış (Yang ve Yang, 2014; Esmer ve Elmalı, 2021; Albayın, 2019) olarak birbirine bağlantılı adımların analizi için kullanılan teoride; bekleme süresi veya kuyruğun uzunluğu gibi bekleme hattının çeşitli özellikleri matematiksel olarak ifade edilir (Modi vd., 2019; Albayın, 2019).

Sistem mekanizması şu şekilde işler: Hizmet alıcısı, hizmet ya da ürün almak için hizmet (servis) sağlayıcısına ulaştığı anda servis kanalı/kanalları dolu ise kuyruğa girer (Şekil 1) ve işlem sonucunda kuyruktan ayrılır.



Şekil 1. Kuyruk modeli

Sıranın uzunluğu ve sırada bekleme zamanı sistemin trafik yoğunluk oranına bağlı olarak değişir. Yoğunluk oranı, geliş oranı/servis oranıdır (Sarıaslan, 1986). Eğer yoğunluk oranının 1'den büyük olma durumunda sıranın sınırsız biçimde uzayacağı düşünülür (Sarıaslan, 1986; Yang ve Yang, 2014; Dragu vd., 2017). Ancak bu durum gerçek hayatla tam olarak bağdaşmamaktadır çünkü zorunlu değilse, çok uzun bir kuyruğa müşteri girmeyebilir ya da servis sağlayıcı, belli bir hizmet kapasitesi varsa bu kapasiteye ulaştığında müşterileri bu noktadan sonra geri çevirebilir (Sarıaslan, 1986).

Ancak özellikle köprü geçişi gibi kullanımı zorunlu olabilen yerlerde, sıra dışı şartlarda oluşan kuyruklar taşıtlar için %90'ın üzerinde vakit kaybına neden olabilmektedir (Gross ve Harris, 1974).

Kuyruk gecikmeleri şahıslar, firmalar ve işletmeler için sadece zaman kaybına neden olmamakta ayrıca ekonomik kayıplar da doğurmaktadır. Örneğin bir gişede bekleyen şahıs için zaman kaybı tek problem olsa da limana yanaşmak için bekleyen bir gemi için ürün ve işçilik kayıpları nedeniyle ekonomik sorunlar yaşanmaktadır. Ayrıca araçların fazladan trafikte vakit geçirmeleri hem yakıt giderleri hem de çevresel olarak emisyon salınımları için olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.

Dikkate alınması gereken önemli bir nokta da sıkışıklığa ya da gecikmeye neden olan araç sayısının yanı sıra araçların boyutsal olarak ayrılış süresini etkilemesidir (Kumaran vd., 2019). Bu durum özellikle kavşak ve trafik ışıklarında kuyruk oluşumunu artırmaktadır. Trafikteki uzun ya da ağır tonajlı araçlar özellikle trafik ışıklarından ayrılış sırasında kuyruktaki boşalmayı diğer araçlara göre olumsuz etkilemektedirler.

Kuyruk teorisinde müşterilerin kuyruğa gelişi deterministik (belirli) ya da rasgele olabilmektedir (Gross ve Harris, 1974; Aydın, 2003). Rasgele gelişleri modellemek için geliş süreci için üstel dağılım sıkça kullanılır burada gelişlerin poisson dağılımına uygun olduğu kabul edilir (Sariaslan, 1986; Aydın, 2003; Dragu vd., 2017; Modi vd., 2019)

Servis süreci ise ilk gelen ilk hizmet alır (standart kuyruk dizilimi), son gelen ilk hizmet alır (asansöre biniş ve iniş durumu düşünülebilir) (Gross ve Harris, 1974; Winston, 2004), düzenli bir sıra olmadan ve geliş sırası dikkate alınmadan servis alınır (bir anayola katılım sırasında bağlanan yolda düzenli bir sıra olmayabilir ve araçlar kendilerince katılım yapabilecekleri anlarda gelişi güzel anayola katılabilir), önceliği yüksek olan (hastanelerin acil servislerinde olduğu gibi) ilk servis alır şeklinde sınıflandırılabilir (Sariaslan, 1986; Winston, 2004).

Kuyruk sistemleri tek kanallı ve çok kanallı olarak sınıflandırılmaktadırlar (Gross ve Harris, 1974; Aydın, 2003; Winston, 2004; Şimşek, 2004; Yang ve Yang, 2014; Albayın, 2019).

Eğer sistemde müşteri sayısı servis kanalı sayısından az ise kuyruk oluşmayacaktır. Gelen sayısının sistemden çıkan sayısından fazla olması durumunda kuyruk oluşacak ve yeni servis kanalı ihtiyacı doğabilecektir.

Geliş ve ayrılış kabulleri üç değer ile tanımlanır. İlk değer geliş (varış) oranı varsayımı, ikinci değer ayrılık (çıkış) oranı varsayımını belirtir, üçüncü değer çıkış kanalı sayısıdır. Trafik geliş ve çıkış oranları varsayımlarında; D,

deterministik ve uniform dağılımı, M ise üstel dağılımı simgeler. D/D/1 kuyruk modeli, deterministik geliş ve çıkışların tek bir kanalla yapıldığını belirtir. M/D/1 kuyruk modeli üstel geliş zamanları dağılımı, deterministik ayrılış zamanlarını ve yine tek servis kanalını belirtir (9). M/M/N kuyruk modeli üstel geliş ve ayrılış zamanlarını ve N servis kanalı sayısını belirtir (Gross ve Harris, 1974; Sarıaslan, 1986; Şimşek, 2004; Yang ve Yang, 2014) Kuyruk oluşum alanları; paralı bir köprü gişesi, sinema gişesi, araçlar için yakıt alımı sırası, araç muayene istasyonları, banka şubeleri, alışverişte kasa kuyruğu gibi çok farklı şekillerde çeşitlendirilebilirler. Kuyruk oluşumu için ücretli bir işlem yapma zorunluluğu yoktur. Örnek olarak kavşaklarda araçların oluşturduğu yığılım gösterilebilir. Örneklerden anlaşılacağı gibi kuyruk teorisi sadece ulaştırma alanında değil her sektör için yaygın olarak kullanılabilir. Ancak literatürde sıklıkla kullanılan ulaştırma alanları şu şekilde özetlenebilir:

Operasyon bekleyen gemiler için maliyeti minimum yapacak liman ekipmanı boyutlandırma modeli (Dragu vd., 2017), marinalarda bekleme süresini en aza indirmek (Kuleyin vd., 2019), boğazda tanker geçiş kapasitesi (Şimşek, 2004), trafik gecikmesini azaltmak amacıyla trafik ışığı optimizasyonu (Ekeocha ve Ihebom, 2018), kavşak bağlantı kollarındaki gecikmeler (Güneş vd., 2020), trafik sinyal süresi tahmini (Kumaran vd., 2019), gemi geçişi için süreç optimizasyonu (Karaca vd., 2022), otopark doluluğunu belirlemek (Cejka ve Šedivý, 2021) gibi amaçlar için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada; tek servis kanallı ve çok servis kanallı üstel servis zamanlı modeller örnek üzerinden kıyaslanmış olup servis kanal sayısına göre gişelerde ki bekleme süresi ve kuyruk yoğunluğu değerleri ortaya koyulmuştur.

2. Üstel Servis Zamanlı Modellerin Sayısal Olarak Kıyaslanması

Genellikle bahar ve yaz aylarında sıklıkla ziyaret edilen milli parklarda özellikle Pazar günleri ciddi yoğunluklarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle sayısal kıyaslama için bu durumu temsil eden bir örnek seçilmiştir. Park ziyaretinin geliş ve gişe çıkışlarının üstel dağılıma uygunluğu durumuna göre aşağıda ki formüllerden yararlanılarak çözümler yapılmaktadır.

2.1. M/M/1 durumu

Üstel geliş ve üstel ayrılış ve tek servis kanallı (M/M/1) durumu için aşağıdaki formüller ile gerekli hesaplamalar yapılır:

Trafik Yoğunluğu; (Gross ve Harris, 1974; Erşahin, 1995; Ekeocha ve Ihebom, 2018; Modi vd., 2019; Güneş vd., 2020 Karaca vd., 2022)

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Sistemde müşteri bulunmama olasılığı; (Erşahin, 1995; Yang ve Yang, 2014)

$$P = (1 - \rho)$$

Sistemde n sayıda müşteri bulunma olasılığı; (Erşahin, 1995; Yang ve Yang, 2014)

$$P_n = \rho^n (1 - \rho)$$

Sistemde olması beklenen araç sayısı; (Winston, 2004; Şimşek, 2004; Ekeocha ve Ihebom, 2018; Modi vd., 2019; Güneş vd., 2020)

$$L_s = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

Kuyrukta bekleyen araç sayısı; (Gross ve Harris, 1974; Erşahin, 1995; Winston, 2004; Ekeocha ve Ihebom, 2018; Modi vd., 2019; Güneş vd., 2020)

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

Sistemde araç başı ortalama bekleme zamanı; (Gross ve Harris, 1974; Şimşek, 2004; Ekeocha ve Ihebom, 2018; Modi vd., 2019; Güneş vd., 2020)

$$W_s = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

Kuyrukta araç başı ortalama bekleme zamanı; (Gross ve Harris, 1974; Erşahin, 1995; Şimşek, 2004; Ekeocha ve Ihebom, 2018; Modi vd., 2019; Güneş vd., 2020)

$$Wq = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$$

Kısaltmalar;

n = sistemdeki araç sayısı

ρ = trafik yoğunluğu

λ = birim zamanda araçların ortalama geliş oranı

μ = birim zamanda araçların ortalama çıkış oranı

2.2. M/M/2 durumu

Üstel geliş ve üstel ayrılış ve iki servis kanallı (M/M/2) durum için aşağıdaki formüller ile gerekli hesaplamalar yapılır:

1) P_0 (Sistemde araç olmaması olasılığında); (Gross ve Harris, 1974; Yang ve Yang, 2014)

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^N}{N!(1-\frac{\rho}{N})}}$$

2) P_n (Sistemde 'n' sayıda araç olması olasılığında); (Gross ve Harris, 1974)

$$P_n = \frac{\rho^n P_0}{n!} \quad \text{for } n \leq N$$

$$P_n = \frac{\rho^n P_0}{N^{n-N} N!} \quad \text{for } n \geq N$$

3) $P_{n>N}$ (Kuyrukta bekleme olasılığı); (Gross ve Harris, 1974)

$$P_{n>N} = \frac{P_0 \rho^{N+1}}{N! N (1 - \rho/N)}$$

4) L_q (Sistemdeki araçların ortalama kuyruk uzunluğu); (Gross ve Harris, 1974; Yang ve Yang, 2014)

$$L_q = \frac{\rho^{N+1}}{N!N} \cdot \frac{P_0}{(1-\frac{\rho}{N})^2}$$

5) L (Sistemdeki araçların ortalama sayısı); (Sarıaslan, 1986; Winston, 2004; Şimşek, 2004; Yang ve Yang, 2014)

$$L = L_q + \rho$$

6) W (Sistemdeki araçların ortalama kalma süresi); harcanan zaman; (Sarıaslan, 1986; Şimşek, 2004; Yang ve Yang, 2014)

$$W = \frac{L_q}{\lambda} + \frac{1}{\mu}$$

7) W_q (Sistemdeki araçların ortalama bekleme süresi); kuyrukta bekleme süresi; (Sarıaslan, 1986; Winston, 2004; Şimşek, 2004; Yang ve Yang, 2014)

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}$$

Kısaltmalar;

n = sistemdeki araç sayısı

N = ayrılma kanallarının sayısı

ρ = trafik yoğunluğu

λ = birim zamanda araçların ortalama varış oranı

μ = birim zamanda araçların ortalama ayrılış oranı

2.3. Sayısal örnek üzerinden anlatım

Bir milli parka ortalama olarak saatte 240 araç gelmektedir ve saatte ortalama 300 araç ayrılmaktadır. Tek servis kanalı ve iki servis kanalı için gerekli hesaplamaların yapılması istenmektedir.

Tek servis kanalı olması halinde;

$$\lambda = \text{araçların birim zamanda ortalama geliş oranı} = 240/60 = 4 \text{ araç/dakika}$$

μ = araçların birim zamanda ortalama ayrılış oranı = $300/60 = 5$ araç/dakika

2.3.1. Tek Servis Kanallı Durum için Çözüm:

Trafik Yoğunluğu;

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{4}{5} = 0,8$$

Sistemde müşteri bulunmama olasılığı;

$$P = (1 - \rho) = (1 - 0,8) = 0,2 \text{ ya da } \%20$$

Sistemde n sayıda müşteri bulunma olasılığı;

Örnek olarak;

n=3 için

$$P_n = \rho^n (1-\rho) = 0,8^3(1-0,8) = 0,1024 \text{ ya da } \%10,24$$

n = 1 için

$$P_n = \rho^n (1-\rho) = 0,8^1(1-0,8) = 0,16 \text{ ya da } \%16$$

Sistemde olması beklenen araç sayısı;

$$L_s = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = \frac{4}{5-4} = 4$$

Kuyrukta bekleyen araç sayısı;

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{4^2}{5(5-4)} = 3,2$$

Sistemde araç başı ortalama bekleme zamanı;

$$W_s = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{5-4} = 1 \text{ dakika} = 60 \text{ saniye}$$

Kuyrukta araç başı ortalama bekleme zamanı;

$$Wq = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{4}{5(5-4)} = 0,8 \text{ dakika} = 48 \text{ saniye}$$

2.3.2. İki Servis Kanallı Durum İçin Çözüm:

Trafik Yoğunluğu;

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{4}{5} = 0,8$$

Sistemde araç olmaması olasılığı;

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^N}{N!(1-\frac{\rho}{N})}} = \frac{1}{\frac{0,8^0}{0!} + \frac{0,8^1}{1!} + \frac{0,8^2}{2!(1-\frac{0,8}{2})}} = 0,4286 \text{ ya da } \%42,86$$

Sistemde 'n' sayıda araç olması olasılığında;

Örnek olarak;

n = 3 için

n ≥ N durumu

$$P_n = \frac{\rho^n P_0}{N^n - N!} = \frac{0,8^3 \cdot 0,4286}{2^3 - 2!} = 0,0548 \text{ ya da } \%5,48$$

n = 1 için

$$n \leq N \text{ durumu } P_n = \frac{\rho^n P_0}{n!} = \frac{0,8^1 \cdot 0,4286}{1!} = 0,3428 \text{ ya da } \%34,28$$

Görüldüğü üzere; sistemde servis kanalı sayısından daha az araç olma olasılığı kanal sayısından daha fazla araç olma olasılığından daha yüksektir.

Kuyrukta bekleme olasılığı;

$$P_{n>N} = \frac{P_0 \rho^{N+1}}{N!N(1-\rho/N)} = \frac{0,4286 \cdot 0,8^{2+1}}{2!2(1-\frac{0,8}{2})} = 0,0914 \text{ ya da } \%9,14$$

Sistemdeki araçların ortalama kuyruk uzunluğu;

$$L_q = \frac{\rho^{N+1}}{N!N} \cdot \frac{P_0}{(1-\frac{\rho}{N})^2} = \frac{0,8^{2+1}}{2!2} \cdot \frac{0,4286}{(1-\frac{0,8}{2})^2} = 0,1523 \text{ araç}$$

Sistemdeki araçların ortalama sayısı;

$$L = L_q + \rho = 0,1523 + 0,8 = 0,9523 \text{ araç}$$

Sistemdeki araçların ortalama kalma süresi (harcanan zaman);

$$Wq = \frac{L_q}{\lambda} + \frac{1}{\mu} = \frac{0,1523}{4} + \frac{1}{5} = 0,2380 \text{ dakika ya da } 14,28 \text{ saniye}$$

Sistemdeki araçların ortalama bekleme süresi (kuyrukta bekleme süresi);

$$W = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{0,1523}{4} = 0,0380 \text{ dakika ya da } 2,28 \text{ saniye}$$

Hesaplamalardan görüldüğü üzere, sistemde iki gişe çalışma durumunda tek gişe çalışma durumuna göre sistemde bekleyen araç değerleri ve araçların bekleme süreleri oldukça azalmıştır.

2.3.3. İki Kanallı Sistemde Gelen Araç Sayısının Artması Durumu:

Gelen araç sayısının 480 ve ayrılan araç sayısının 300 olduğunu düşünerek çözüm yaparsak:

λ = araçların birim zamanda ortalama geliş oranı = 8 araç/dakika

μ = araçların birim zamanda ortalama ayrılış oranı = 5 araç/dakika

Trafik Yoğunluğu;

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{8}{5} = 1,6$$

Sistemde araç olmaması olasılığı;

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{\rho^n + \rho^N}{n! + N!(1-\frac{\rho}{N})}} = \frac{1}{\frac{1,6^0}{0!} + \frac{1,6^1}{1!} + \frac{1,6^2}{2!(1-\frac{1,6}{2})}} = 0,1111 \text{ ya da } \%11,11$$

Sistemde 'n' sayıda araç olması olasılığında;

Örnek olarak;

n = 3 için

$n \geq N$ durumu

$$P_n = \frac{\rho^n P_0}{N^n - N N!} = \frac{1,6^3 \cdot 0,1111}{2^3 - 2 \cdot 2!} = 0,1137 \text{ ya da } \%11,37$$

$n = 1$ için

$$n \leq N \text{ durumu } P_n = \frac{\rho^n P_0}{n!} = \frac{1,6^1 \cdot 0,1111}{1!} = 0,1777 \text{ ya da } \%17,77$$

Kuyrukta bekleme olasılığı;

$$P_{n>N} = \frac{P_0 \rho^{N+1}}{N! N (1 - \rho/N)} = \frac{0,1111 \cdot 1,6^{2+1}}{2! 2 (1 - \frac{1,6}{2})} = 0,5688 \text{ ya da } \%56,88$$

Sistemdeki araçların ortalama kuyruk uzunluğu;

$$L_q = \frac{\rho^{N+1}}{N! N} \cdot \frac{P_0}{(1 - \frac{\rho}{N})^2} = \frac{1,6^{2+1}}{2! 2} \cdot \frac{0,1111}{(1 - \frac{1,6}{2})^2} = 2,8441 \text{ araç}$$

Sistemdeki araçların ortalama sayısı;

$$L = L_q + \rho = 2,8441 + 1,6 = 4,4441 \text{ araç}$$

Sistemdeki araçların ortalama kalma süresi (harcanan zaman);

$$Wq = \frac{L_q}{\lambda} + \frac{1}{\mu} = \frac{2,8441}{8} + \frac{1}{5} = 0,5555 \text{ dakika ya da } 33,33 \text{ saniye}$$

Sistemdeki araçların ortalama bekleme süresi (kuyrukta bekleme süresi);

$$W = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{2,8441}{8} = 0,3555 \text{ dakika ya da } 21,33 \text{ saniye}$$

Gişe sayısı aynı iken gelen araç sayısının iki katına çıkması nedeniyle kuyruktaki araç sayısı ve bekleme süreleri üstel olarak artmış ve her bir aracın kuyrukta bekleme süresi 2,28 saniyeden 21,33 saniyeye çıkmıştır. Sistemdeki araçların ortalama sayısı ise ilk durumda 0,9523 iken ikinci durumda 4,4441 araç olarak bulunmuştur. Araç sayısı artışıyla birlikte yeni bir gişe açılması ihtiyacı doğmaktadır.

3. Sonuç

Kuyruk teorisinde üstel servis zamanlı modellerin kıyaslandığı bu çalışmada; kuyruk teorisiyle ilgili genel bir literatür bilgisi verilmiş ve üstel servis zamanlı modeller için gelen giden araç durumlarına göre trafik yoğunluğu, sistemde araç bulunma olasılıkları, sistemdeki araç sayıları ve bunların harcadıkları zamanlarla ilgili formülasyon verilmiştir. Üstel servis zamanlı modellerin kıyaslandığı örnekte, aynı müşteri sayısı için hem tek hem de iki servis kanalı için çözüm yapılmış ve ardından müşteri sayısının artmasıyla bekleme sürelerinin ve kuyruk uzunluğunun nasıl değiştiği ortaya koyulmuştur. Ayrıca iki kanallı sistemde gelen müşteri sayısı artışıyla birlikte bekleme süreleri ve kuyruk uzunluğu değerleri önemli oranda artmıştır.

Kuyruk teorisi günümüzde birçok sektör için kullanılan bir yaklaşım olmakla birlikte ulaştırma sistemlerinde ki kuyruk oluşumu çözümleri için kullanımı da oldukça yaygındır. Ulaştırma sistemlerinde meydana gelebilecek gecikmeler şahıs bazında yakıt giderleri açısından önemlidir. Ayrıca konuya çevresel açıdan bakıldığında, araçların vakit kaybı nedeniyle ulaştırma sisteminde daha uzun kalması emisyon değerleri açısından da çevreyi olumsuz etkilemektedir.

KAYNAKÇA

- Yang, S. ve Yang, X. (2014). The Application of the Queuing Theory in the Traffic Flow of Intersection. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*, 8(6), 986-989.
- Ekeocha, R. J. O. ve Ihebom, V. I. (2018). The Use of Queuing Theory in the Management of Traffic Intensity. *International Journal of Sciences*, 7, 56-63. DOI: 10.18483/ijSci.1583
- Esmer, Y. ve Elmalı, K. (2021). Yönetim ve Matematik Bağlantısı. *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 5(1), 77-86. DOI: 10.30692/sisad.878106
- Modi, M., Agarwal, G., Patil, V., Khare, A., Shukla, S. ve Sankhala, A. (2019). Minimization Of Traffic Congestion By Using Queuing Theory. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, 8(10), 532-541.
- Albayın, B. (2019). GI/G/k Kuyruk Modelinde Bulanık Yaklaşım Yardımı ile Performans Ölçülerinin Hesaplanması: *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim Adresi: <http://acikerisim.omu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12712/23224/browse?type=author&value=Albay%C4%B1n%2C+Bet%C3%BCI>
- Sarıaslan, H. (1986). *Sıra Bekleme Sistemlerinse Simülasyon Tekniği*. [Adobe Acrobat Reader sürümü]. Erişim Adresi: <https://dSPACE.ankara.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12575/12488>
- Dragu, V., Dinu, O., Rusca, A., Burciu, Ş. ve Roman, E., A. (2017). Queuing theory models used for port equipment sizing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 222, 1-10. doi:10.1088/1757-899X/227/1/012040
- Gross, D. ve Harris, D.M. (1974). *Fundamentals of Queueing Theory*. Erişim Adresi: <http://courses.washington.edu/cee587/Readings/Chapter%205%20of%20the%20Manning%20Book.pdf>.
- Kumaran, S. K., Dogra, D. P. ve Roy, P. P. (2019). Queuing theory guided intelligent traffic scheduling through video analysis using Dirichlet process mixture model. *Expert Systems With Applications* 118, 169-181. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.09.057>
- Aydın, Ö. M. (2003). Çok Kanallı Kuyruk Sistemlerine Bulanık Yaklaşım: *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (Doktora Tezi). Erişim Adresi: <https://dSPACE.ankara.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12575/37361>
- Winston, W. L. (2004). *Operations Research Applications and Algorithms*. Erişim Adresi: <https://itslearningakarmazyar.files.wordpress.com/2015/09/operation-research-aplications-and-algorithms.pdf>
- Şimşek, H. (2004). Kuyruk Teorisinin İstanbul Boğazı Tanker ve Gemi Geçişleri ile Haydarpaşa Limanı Konteyner Terminaline Uygulanması: *İstanbul Teknik*

- Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim Adresi: <https://polen.itu.edu.tr/items/d5b42c62-063d-4c95-b844-5da88a0837b9>
- Kuleyin, B., Çetinkaya, V. ve Akdaş, O. (2019). Marinaların Optimum Bağlama Kapasitesinin Belirlenmesinde Kuyruk Teorisi Yaklaşımı: Bodrum Örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi, UDTS 2018 Özel Sayı*, 93-105.
- Güneş, F., Bayraklı, S. ve Zaim, A. H. (2020). Sinyalize Bir Kavşakta Oluşan Trafik Akımının Kuyruk Teorisi ile Performansının İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 19, 56-65. DOI: 10.31590/ejosat.711094
- Karaca, İ., Arslan, Ö. ve Söner, Ö. (2022). İstanbul Boğazı Gemi Boğaz Geçiş Kuyruk Teorisi Uygulaması ve Süreç Optimizasyonu. *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 109–129. doi:10.38002/tuad.1123017
- Cejka, J. ve Šedivý, J. (2021). Discussion of Operational Transport Analysis Methods and the Practical Application of Queuing Theory of Stationary Traffic. *Transportation Research Procedia*, 53, 196-203.
- Erşahin, O. (1995). Kuyruk Modelleri ve İşletmelere Uygulanması: *Yıldız Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim Adresi: <http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/6823>