



MÜHENDİSLİK ALANINDA ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRMELER

EYLÜL/2021

EDİTÖRLER

PROF. DR. BANU NERGİS
DOÇ. DR. SELAHATTİN BARDAK
DOÇ. DR. MAHMUT KAYAR
DR. ARİF FURKAN MENDİ

gece
kitaplığı

İmtiyaz Sahibi / Publisher • Yaşar Hız
Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel
Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı
Editörler / Editors • Prof. Dr. Banu NERGİS
Assoc. Prof. Dr. Selahattin BARDAK
Assoc. Prof. Dr. Mahmut KAYAR
Dr. Arif Furkan MENDİ
Birinci Basım / First Edition • © Eylül 2021
ISBN • 978-625-8002-51-5

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla
çoğaltılamaz.

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

Gece Kitaplığı / Gece Publishing
Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak Ümit Apt.
No: 22/A Çankaya / Ankara / TR
Telefon / Phone: +90 312 384 80 40
web: www.gecekitapligi.com
e-mail: gecekitapligi@gmail.com



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

Mühendislik Alanında Araştırma ve Değerlendirmeler

Eylül / 2021

EDİTÖRLER

PROF. DR. BANU NERGİS

DOÇ. DR. SELAHATTİN BARDAK

DOÇ. DR. MAHMUT KAYAR

DR. ARİF FURKAN MENDİ

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEMLERDE KAOS ANALİZ YÖNTEMLERİ

Kenan ALTUN 1

Bölüm 2

POLYESTER ELYAF ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE GENEL BİR BAKIŞ

Öznur ÖZDİNÇ 25

Bölüm 3

BİYOGAZDAN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİNİN İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Canan GÖREKE & Şükrü KİTİŞ & Yusuf YALÇIN3 43

Bölüm 4

POLİAKRİLONİTRİL ESASLI KARBON LİF ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE ALTERNATİF STABİLİZASYON ÇALIŞMALARI

Kemal Şahin TUNÇEL & Tuba DEMİREL & İsmail KARACAN..... 67

Bölüm 5

DİJİTAL İKİZ TEKNOLOJİNE GİRİŞ

Arif Furkan MENDİ..... 97

Bölüm 6

BİYOMALZEMELER İÇİN HÜCRE KÜLTÜRÜ ÇALIŞMALARI

Sevda ALBAYRAK & Beyza KÜTÜK & Canser GÜL..... 113

Bölüm 7

KENTSEL ATIK SULARDAKİ UYUŞTURUCU MADDELERİN EPİDEMİYOLOJİK ÇALIŞMALARDA KULLANIMI VE UZAKLAŞTIRILMASI

Elif ÖZTEKİN & Sinem ÇOLAK 129

Bölüm 8

SOĞUKTA MUHAFAZA KOŞULLARINI DESTEKLEYİCİ YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR

Tuncay YILMAZ 147

Bölüm 9

TARIMSAL ATIKLARIN ADSORBAN OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Nesli AYDIN & Gül KAYKIOĞLU 161

Bölüm 10

KENTSEL ÖLÇEKTE ULAŞIM AMAÇLI BİSİKLET KULLANIMI VE SAĞLIK AÇISINDAN ETKİLERİ

Hümeyra BOLAKAR TOSUN 181

Bölüm 11

İSTATİSTİKSEL ÖLÇEK İNDİRGEME YÖNTEMİ UYGULANARAK AYLIK TOPLAM AÇIK YÜZEY BUHARLAŞMASI DEĞERLERİNİN TAHMİNİ: ANTALYA

Sefa Nur YEŞİLYURT & H. Yıldırım DALKILIÇ 195

Bölüm 12

ATIK CAM VE OBSİDİYEN KULLANILARAK AGLOMERA TAŞI ÜRETİMİ

Hakan ELÇİ & Çetin YEŞİLOVA & Ramazan HACIMUSTAFAOĞLU
& İlker ÖZKAN 213

Bölüm 13

ÜCRETSİZ MATEMATİKSEL MODEL ÇÖZÜCÜ SEÇİMİ:
ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ TEMELLİ BİR UYGULAMA

Hamid YILMAZ 235

Bölüm 14

PTFE DİELEKTRİK MALZEME YÜZEYİ İÇİN HİDROFOBİSİTE
VE BUHARLAŞMA HIZI İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ

Mustafa KARHAN 251

Bölüm 15

İSTATİSTİK VE DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİ
KULLANILARAK HASTA RADYOLOJİK GÖRÜNTÜ
SAYILARININ GELECEK TAHMİNLERİNİN YAPILMASI

Erkan YALDIZ..... 265

Bölüm 16

MANYETİK SIVI HİPERTERMİDE SABİT MİKNATIS
DİZİLERİNİN KULLANIMI

Serhat KÜÇÜKDERMENCİ 295

Bölüm 17

METALİK KÖPÜKLER VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Berkant DİNDAR 313

Bölüm 18

Tİ6AL4V TİTANYUM ALAŞIMINA UYGULANAN BORLAMA
İŞLEMLERİNİN İNCELENMESİ

İlyas TÜRKMEN & Oktay ASLAN 327

Bölüm 19

YÖRESEL GIDA VE YÖRESEL YEMEKLER İLE İLGİLİ BİR
İNCELEME: KIRŞEHİR ÖRNEĞİ

Gözde PEKÖZ & Özlem AYDIN 357

Bölüm 20

SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR YAPILARINDAKİ MANYETİK MALZEMELERİN İNCELENMESİ

Ali Sinan ÇABUK..... 377

Bölüm 21

KENEVİR ELYAFIN ÖZELLİKLERİ VE KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Yalçın BOZTOPRAK 395

Bölüm 22

COVID-19 HASTALIK TEŞHİSİ İÇİN DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMLARI

Handan SANCAR & Hasan ŞAHİN 409

Bölüm 1

DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEMLERDE KAOS ANALİZ YÖNTEMLERİ

Kenan ALTUN¹

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Sivas, Türkiye. kaltun@cumhuriyet.edu.tr

1. Giriş

Kaotik sistemler, farklı başlangıç koşullarında rasgele davranış sergileyen ve tahmin edilemeyen, sistem parametrelerine aşırı duyarlı, gürültü benzeri dinamik sistemler olarak tanımlanabilir (Ott ve ark., 1990). Kaotik dinamik denklemler ilk olarak Henri Poincaré tarafından on dokuzuncu yüzyılın sonlarında basit dinamik denklemler kullanılarak ifade edilmiştir (Holmes, 1990). Ancak bilimsel olarak ilk uygulaması 1963 yılında Edward Lorenz'in hava tahmini çalışmasında yer bulmuştur (Lorenz, 1963). Kaotik sistemler, içerisinde en az bir tane doğrusal olmayan terim içeren üçüncü dereceden dinamik denklemlerle ifade edilir. Dinamik denklemler birçok fiziksel yapının nümerik olarak modellendiği denklemlerdir. Dinamik denklemler doğrusal ve doğrusal olmayan denklemler olarak sınıflandırılır. Doğrusal denklemler, sistemin herhangi bir t anındaki davranışı tahmin edilebildiğinden kararlıdır. Doğrusal olmayan dinamik sistemler periyodik olmayan sistemler olarak da ifade edilir. Bu sistemler kararsız yapıda olduğundan sistem davranışları tahmin edilemez. Doğrusal olmayan dinamik sistemlerin periyodikliğinin incelenmesi birçok doğrusal olmayan uygulama için önemlidir. Sistemin kararlı veya kararsız noktalarının bilinmesi, temsil ettiği sistemin kontrolünü mümkün kılmaktadır. Dünyada birçok yapı doğrusal olmayan dinamik denklemlerle tanımlanabilir. Ancak doğrusal olmayan denklemler analitik olarak çözmek kolay değildir. Doğrusal olmayan dinamik sistemleri analiz etmek ve kontrolünü sağlamak için çoğunlukla yaklaşım metotları kullanılmıştır. Doğrusal olmayan dinamik denklemlerin analizini kolaylaştırmak, kendi içerisinde sınıflandırmak ve kullanım alanını belirlemek için geliştirilen görsel ve nümerik birçok yaklaşım kullanılmıştır (Alpigni, 2004). Dinamik sistemde verilerin görselleştirilmesi, analistlerin karmaşık veri kümelerindeki gizli dokuyu tespit etmesine ve incelemesine yardımcı olur (Chen, 2004). İlk olarak Lorenz kaotik çeker yapılarının görselleştirilmesiyle önemli adımlar atılmıştır (Lorenz, 1963). Daha sonraları çatallanma diyagramları (May, 1976), faz diyagramları, doğrusal olmayan dinamiklerin görselleştirilmeleri gerçekleştirilmiştir (Packard ve ark., 1980; Bradley, 1999; Bradley ve ark., 2015).

Bu çalışmada doğrusal olmayan sistemlerde en çok kullanılan yöntemlerin incelenmesi ve örneklendirilmesi sunulmuştur. Doğrusal olmayan sistemlerin analitik olarak çözülmesi son derece zordur çünkü denklemler parçalara ayrılamazlar. Bunları çözmek yerine, bu çalışma sistem davranışını ve kararlılığını belirlemek için görsel yöntemleri açıklamıştır. Bu yöntemler, temel dinamikleri iyi bilinmeyen zaman serilerindeki gizli yapı ve kalıpları ortaya çıkararak bilimsel ve

profesyonel görsel veri analizine geniş uygulama alanları açmaktadır. Özellikle, doğrusal olmayan dinamik sistemlerin zaman içinde ve/veya parametre değişikliklerine cevap olarak matematiksel davranışını ortaya çıkarırlar. Bu görselleştirme yöntemleri, araştırmacıların doğrusal olmayan dinamik sistemlerin ve kaosu davranışını keşfetmesine, incelemesine ve anlamasına yardımcı olabilir. Bu çalışmada üçüncü derece dinamik denklemlere sahip Lorenz dinamik sistemin farklı analiz yöntemleri ile kaos kontrolü gerçekleştirilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma(y - x) \\ \dot{y} &= x(\rho - z) - y \\ \dot{z} &= xy - \beta z\end{aligned}\tag{1}$$

Denklem (1) ile verilen Lorenz sisteminde kaos şartlarının olduğu $\sigma = 10$, $\rho = 28$ ve $\beta = 8/3$ parametre değerleri için sistemin kaos analizi yapılacaktır.

2. Kaos Analiz Yöntemleri

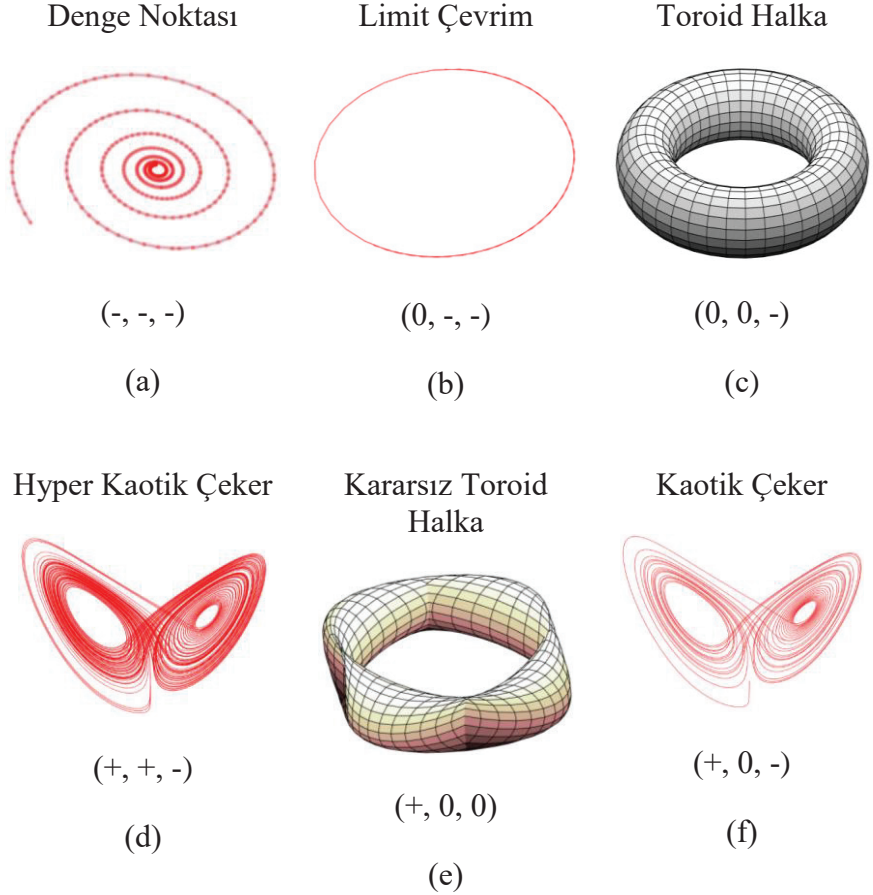
Dinamik denklemlerle modellenmiş doğrusal olmayan bir sistemde kaos analizi; Lyapunov üstellerine, Poincare kesit gösterimine, güç ve frekans spektrumuna, dallanma diyagramına, zaman ve faz gösterimlerine, denge noktası ve kararlılık analizine, 0/1 test sonuçlarına, simetrik ve korunum(dissipation) analizlerine bakılarak gerçekleştirilir. Denklem (1) ile dinamik denklemleri verilen Lorenz kaotik sisteminin yukarıda ifade edilen bu analizleri yapılarak sonuçlarını elde edelim.

2.1. Lyapunov Üstelleri

Kaotik dinamik sistemlerde başlangıç değerlerine bağlılık önemli karakteristiklerindedir. Lyapunov üstelleri, kaotik sistemleri tanımlamak için önemli bir metottur (Wolf ve ark., 1985). Çünkü, kaotik dinamik sistemlerde farklı başlangıç değerleri için sistemin faz uzay gösteriminde takip ettiği yol birbirinden üstel bir fonksiyon ile uzaklaşmaktadır. Dinamik sistemlerde sinyallerin faz uzayında takip ettiği yola yörünge denir. Sistemin bu belirsiz davranışı tahmin edilebilirliğini azalttığından hesaplanmasını da zorlaştırmaktadır. Yörüngelerin birbirinden uzaklaşmalarının bir ölçütü olan ve Lyapunov üsteli olarak ifade edilen bir değer hesaplanır. m boyutlu bir dinamik sistem için m adet Lyapunov üsteli hesaplanır. Hesaplanan bu üstellerin en büyüğünün pozitifliğine

bağlı olarak kaotik yapının varlığı belirlenir. En büyük Lyapunov üssünün pozitifliği kaotik sistemler için en önemli gösterge olurken, sıfır olması periyodikliği, negatif olması ise sabit bir noktayı (fixed point) ifade eder. Bir m-boyutlu sistem, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ olan m adet Lyapunov üssüne sahip olacaktır.

Üç boyutlu sistem için çekeri tanımlamak için altı koşul vardır: $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (-, -, -)$ denge noktasına karşılık gelir. $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (0, -, -)$ limit çevrim karşılık gelir. $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (0, 0, -)$ toroidal halkasına karşılık gelir. $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (+, +, -)$ hyper kaos durumuna karşılık gelir. $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (+, 0, 0)$ kararsız iki boyutlu halkaya karşılık gelir. $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (+, 0, -)$ kaos durumuna karşılık gelir.



Şekil 1. Doğrusal Olmayan Sistemlerde Çeker Tipleri; (a) Denge Noktası, (b) Limit Çevrim, (c) Toroid Halka, (d) Hyper Kaotik Çeker, (e) Kararsız Toroid Halka, (f) Kaotik Çeker.

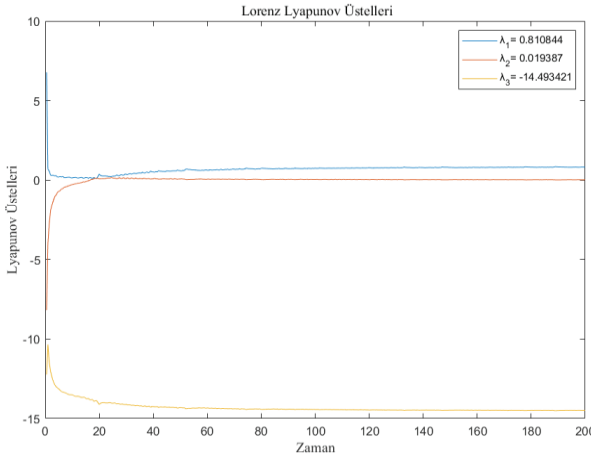
Dinamik denklemleri verilen bir sistemde Lyapunov üstelleri hesaplanırken komşu yörüngeler arasındaki mesafe (d), $t = t_0$ anında yörüngeler arasındaki mesafe (d_0), ile ifade ettiğimizde denklem (2)'de verilen üstel bir fonksiyonla birim zamandaki değişim elde edilir.

$$d(t) = d_0(t_0)e^{\lambda t} \quad (2)$$

Denklem (2)'de λ ; Lyapunov üsteli olup yörüngeler arasındaki mesafenin değişimine karşılık gelen bir parametredir. Buna göre, Lyapunov üsteli denklem (3) ile hesaplanabilir (Szemplinska, 2003).

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{d}{d_0} \quad (3)$$

Burada, hesaplanan Lyapunov üstellerinde $\lambda > 0$ ise, yörüngeler birbirinden uzaklaşırken $\lambda < 0$ ise yörüngeler birbirine yaklaşır (Szemplinska, 2003). Lorenz kaotik dinamik sistem için hesaplanan Lyapunov üstelleri Şekil-2'de verilmiştir.



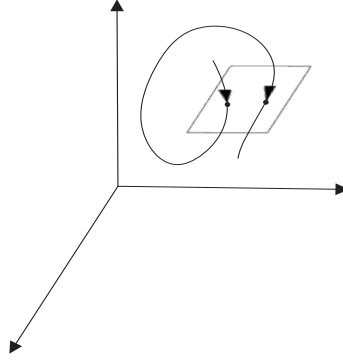
Şekil 2. Lorenz dinamik sisteme ait Lyapunov üstelleri.

Lorenz kaotik sistem için Lyapunov üstelleri $\lambda_1 = 0,810844$, $\lambda_2 = 0,019387$ ve $\lambda_3 = -14,493421$ olarak hesaplanmıştır. Buradan da

anlaşılabilirliği gibi en az bir pozitif Lyapunov üsteline sahip olduğundan Lorenz dinamik sistemi kaotik davranış göstermektedir.

2.2. Poincare Haritalama

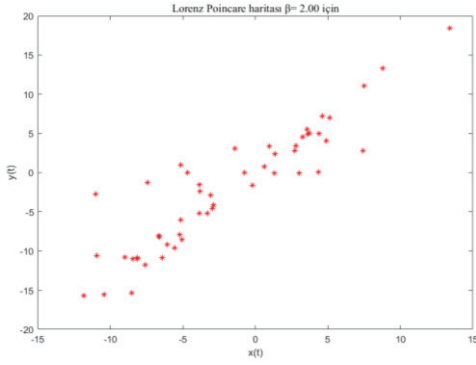
Doğrusal olmayan dinamik sistemlerde kaos analizi yapılabilen yöntemlerden birisi de Poincare tarafından ortaya konmuştur. Poincare haritalama olarak ifade edilen bu yöntem n . dereceden sürekli zaman dinamik sistemleri ($n-1$). dereceden ayrık zaman sistemlere dönüştürerek analiz yapma işlemidir (Özer ve ark., 2012).



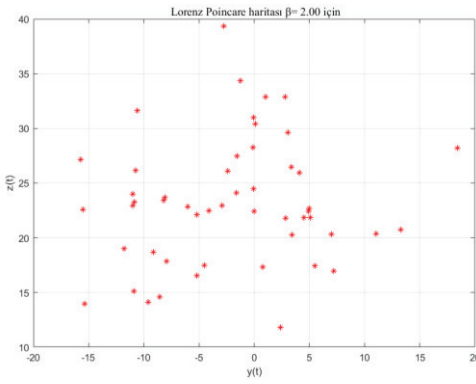
Şekil 3. Poincare kesit örnekleme.

Bu metotta, Şekil-3'de de gösterildiği gibi doğrusal olmayan sistemin faz uzay gösteriminde Poincare haritalama yapılarak bir kesit seçilir. Seçilen bu kesit üzerinden geçen yörüngelerin geçtiği noktalar işaretlenerek Poincare haritası elde edilir. Doğrusal sistemlerde elde edilen Poincare haritasında yörüngeler aynı noktayı takip edeceğinden sadece iki nokta oluşur. Bu noktalar kesiti periyodik kapalı çevrimi tamamlayan noktalardır. Doğrusal olmayan sistemlerde ise Poincare haritasında seçilen kesit rastgele oluşan noktalardan oluşur. Gelişigüzel oluşan bu noktalar sistemin kaotik olduğunu gösterir. Poincare haritalama, doğrusal olmayan dinamik sistemlerde kaos analizini basite indirmek için kullanılan bir yöntem olarak kullanılır (Baker ve ark., 1996).

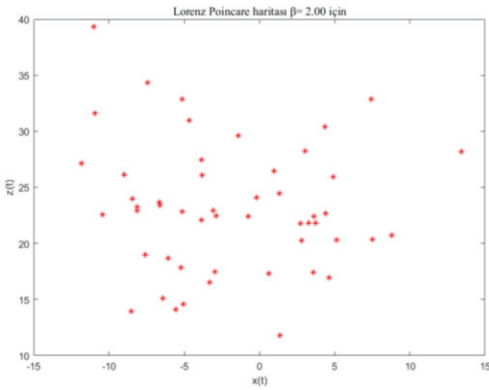
Çalışmada analizi yapılan Lorenz dinamik denklemlerinde $\beta = 2$ seçilerek elde edilen Poincare haritalarında, Şekil-4'de gösterilen a) $x(t)$ - $y(t)$ faz uzayında, b) $y(t)$ - $z(t)$ faz uzayında, c) $x(t)$ - $z(t)$ faz uzayında elde edilen kesitler verilmiştir.



(a)



(b)



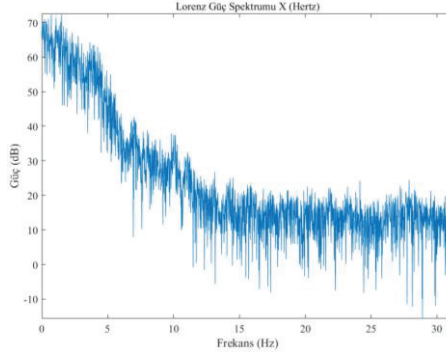
(c)

Şekil 4. Poincare kesit gösterimi a) $x(t)$ - $y(t)$ faz uzayında, b) $y(t)$ - $z(t)$ faz uzayında, c) $x(t)$ - $z(t)$ faz uzayında.

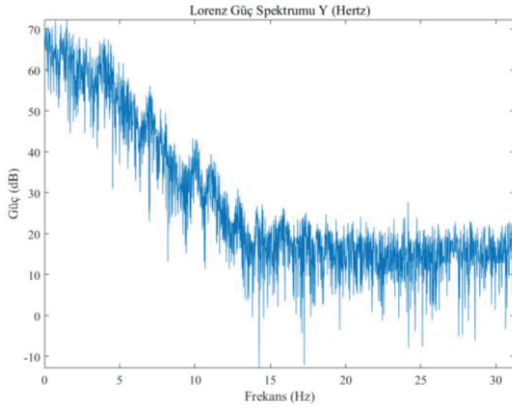
Şekil-4’de elde edilen faz uzay yörüngelerinden elde edilen kesitler incelendiğinde Lorenz dinamik denklemlerin $\beta = 2$ için kaotik davranış sergilediği görülmektedir.

2.3. Güç Spektrumu ve Frekans Spektrumu

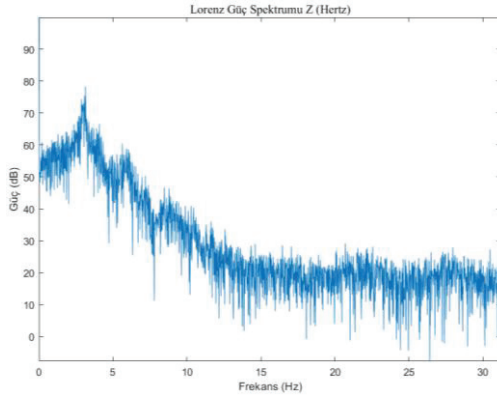
Dinamik sistemler için frekans spektrum analizinde sinyaller, zaman eksenini yerine frekans domeninde gösterilir. Doğrusal sistemlerde frekans spektrumu dar band üzerine tek bir tayf şeklinde olmaktadır. Doğrusal olmayan sistemlerde ise frekans spektrumu geniş band üzerine yayılır. Frekans cevabı geniş band üzerinde olduğundan yayılı spektrum olarak adlandırılır. Frekans spektrumunun bu cevabı özellikle haberleşme sistemlerinde bilgi sinyalinin gizlenmesini sağlar. Dolayısıyla doğrusal olmayan kaos tabanlı sinyallerin güvenilir haberleşme sistemlerinde kullanılmasıyla bilgi sinyalinin arka planda gizlenmesi sağlanmıştır. Çalışmada Lorenz dinamik sisteminin kaos analiz için elde edilen güç spektrum ve frekans spektrum analizleri Şekil-5’de verilmiştir. Buna göre Şekil-5 (a)’da x durum değişkeninin güç spektrum analizi, Şekil-5 (b)’de y durum değişkeninin güç spektrum analizi, Şekil-5 (c)’de z durum değişkeninin güç spektrum analizi ve Şekil-5 (c)’de ise frekans spektrum analizi verilmiştir. Analizlerden de anlaşılacağı gibi spektrum geniş band aralığına yayılmış olduğundan sistem kaotik davranış sergilemektedir.



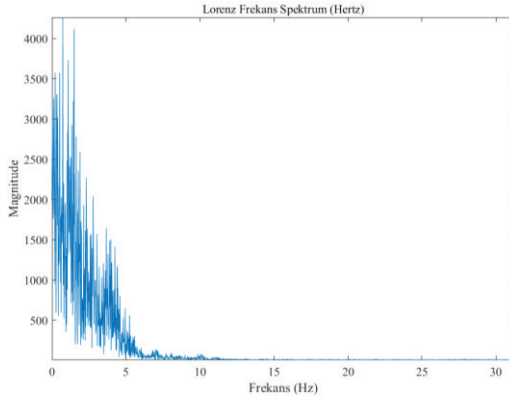
(a)



(b)



(c)



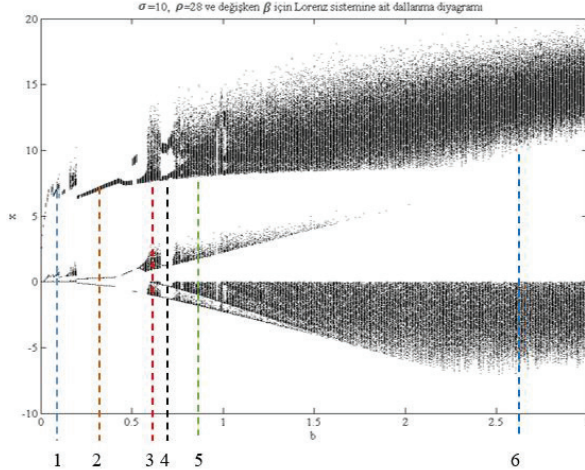
(d)

Şekil 5. Lorenz kaotik üreticinde; (a) x dinamiği güç spektrumu, (b) y dinamiği güç spektrumu, (c) z dinamiği güç spektrumu, (d) frekans spektrumu.

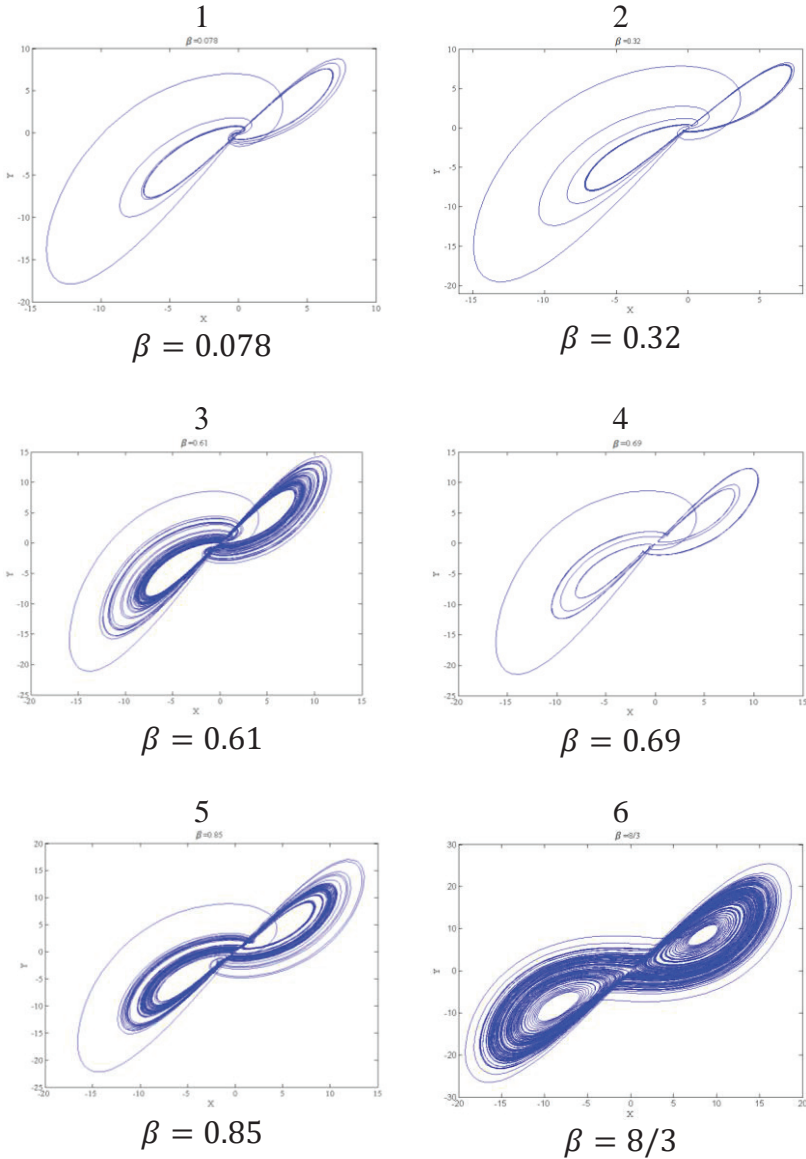
2.4. Dallanma Diyagramı

Daha öncede ifade edildiği üzere, doğrusal olmayan dinamik sistemlerde kaos şartları, başlangıç değerlerinin yanı sıra parametre değişiminin hassasiyetine de bağlıdır. Çatallanma veya dallanma diyagramı olarak da ifade edilen yöntem diğer yöntemlerden farklı olarak bir parametrenin değişimine bağlı olarak bir durum değişkeninin kaotik analizini inceler (Moon, 1987). Buna göre dinamik bir sistemin asimptotik analizi düşey eksende gösterilirken yatay eksen ise parametre değişimine bağlı olarak durum değişkeninin kaotik davranışı gösterilir. Dallanma diyagramı elde edilen durum değişkeninin parametre değişimine bağlı olarak kararlılığı, periyot davranışı ve kaos durumları kolaylıkla gözlemlenir. Böylelikle parametrenin durum değişkeni için hangi değer sınırları içerisinde olması gerektiği belirlenir.

Bu çalışmada kaos analizi yapılan Lorenz dinamik sisteminde x durum değişkeninin β durum değişkenine bağlı olarak analizi yapılmıştır. Şekil-6 (a) incelendiğinde $\beta = 0.078$, $\beta = 0.32$ ve $\beta = 0.69$ değerleri için 1, 2 ve 4 numara ile hizalanmış dallanma diyagramlarına ait x - y faz uzay gösterimleri incelendiğinde periyodik pencereler oluşmaya başladığı ancak sistemin kaotik davranış göstermediği görülmektedir. $\beta = 0.61$, $\beta = 0.85$ ve $\beta = 8/3$ değerleri için 3, 5 ve 6 numara ile hizalanmış dallanma diyagramlarına ait x - y faz uzay gösterimleri incelendiğinde ise sistemin kaotik davranış gösterdiği görülmektedir.



(a)



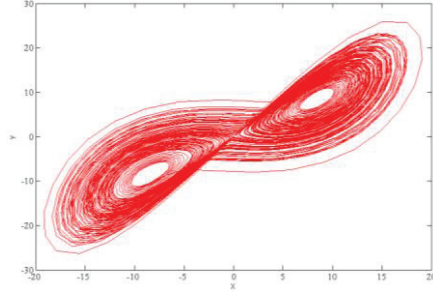
(b)

Şekil 6. Lorenz sistemine ait dallanma diyagramı.

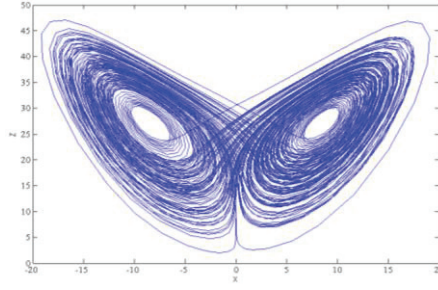
Sonuç olarak dallanma diyagramları doğrusal olmayan dinamik sistemin tamamının kaos analizini değil, parametre değişimine karşılık bir durum değişkeninin periyodikliği ve kaotik durumu incelenir.

2.5. Faz Uzay Gösterimi

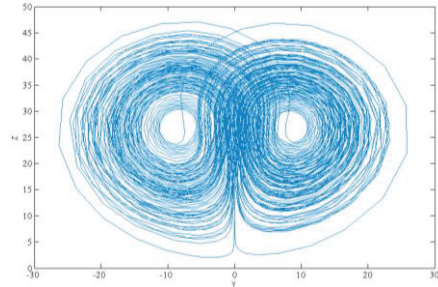
Doğrusal olmayan bir dinamik sistemdeki durum değişkenlerinin birbirleri ile uzaysal davranışlarının incelenmesine faz uzayı gösterimi denir. Faz uzay gösterimi ile durum değişkenlerinin birbirleriyle olan davranışları iki boyut üzerinde gösterilerek sistemdeki kaos varlığı tespit edilir (Lorenz, 1963). Eğer sistem periyodik bir davranış gösteriyorsa faz uzayındaki yörüngeler birbirini takip eden kapalı bir çevrim gösterir ve sürekli olarak tekrarlanır. Faz uzay gösterimi yapılan sistemin davranışı düzensiz gibi görünen ancak kendi içerisinde belirli yörüngeleri takip eden bir gösterime sahip ise sistemin kaotik varlığı tespit edilmiş olur. Aşağıda kaos analizi yapılan Lorenz dinamik sistemine ait; Şekil-7 (a)'da x-y faz-uzay gösterimi, Şekil-7 (b)'de x-z faz-uzay gösterimi ve Şekil-7 (c)'de y-z faz-uzay gösterimi verilmiştir.



(a)



(b)



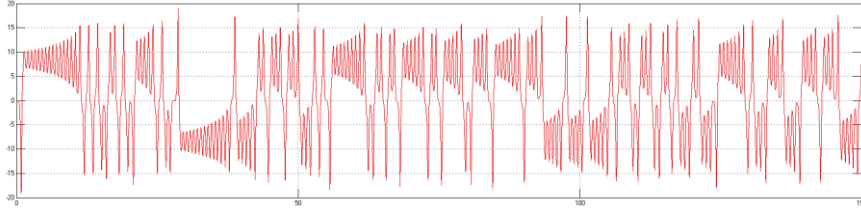
(c)

Şekil 7. Lorenz sisteminin benzetiminden elde edilen faz uzay gösterimi.

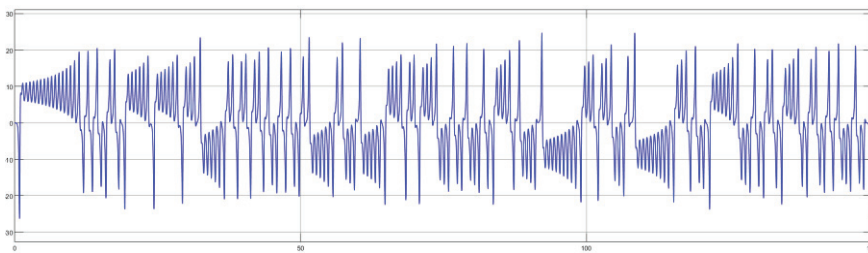
Şekil-7 ile verilen Lorenz dinamik sisteme ait faz uzay gösterimleri incelendiğinde her bir durum değişkeninin diğer durum değişkeni ile ilişkisinde bir düzensizlik ancak belirli yörüngeler etrafında bir düzen vardır. Bu durum Lorenz dinamik sistemindeki kaotik davranışın varlığını ortaya koymaktadır.

2.6. Zaman Domeni Gösterimi ve Başlangıç Değer Hassasiyeti

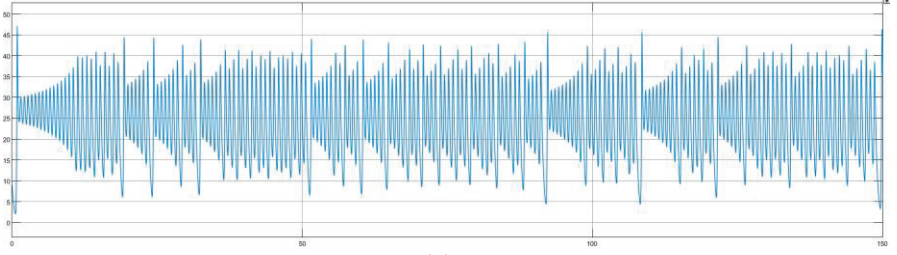
Dinamik bir sistemde durum değişkeninin zaman eksenindeki gösterimi, değişkenin doğrusallığı konusunda önemli bir veridir. Durum değişkeni zaman ekseninde sürekli olarak tekrar ediyor ve doğrusal olarak tahmin edilebilir bir karakteristik sergiliyorsa bu durum değişkenleri ve dinamik sistem periyodiktir denir (Strogatz, 1994). Dinamik sisteme ait durum değişkeni kendini tekrar etmiyor ve farklı başlangıç değerleri için farklı davranışlar sergiliyorsa bu sistemler kaotik sistemler olarak adlandırılır. Lorenz kaotik sisteminin denklem takımında bulunana x , y ve z durum değişkenlerine ait zaman eksenindeki gösterimleri: x durum değişkeni için Şekil-8 (a)'da, y durum değişkeni için Şekil-8 (b)'de ve z durum değişkeni için Şekil-8 (c)'de verilmiştir. Ayrıca x durumu değişkeni için $x_0=0$ ve $x_0=0.001$ başlangıç değerleri için çizdirilen Şekil-8 (d)'deki zaman eksenindeki sistem davranışları incelendiğinde sistemin kaotik davranış sergilediği gözlemlenmiştir.



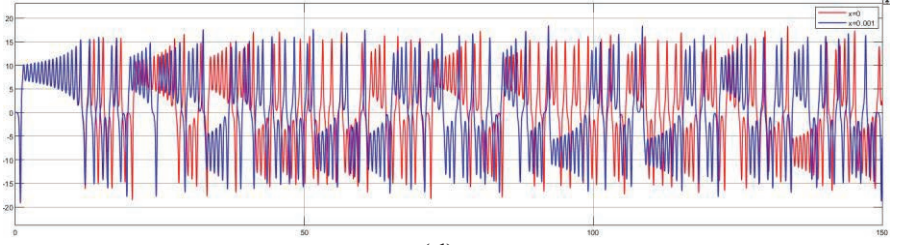
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 8. Lorenz sistemine ait: (a) $x(t)$ zaman eksenini, (b) $y(t)$ zaman eksenini, (c) $z(t)$ zaman eksenini.

2.7. Denge Noktası ve Kararlılık

Doğrusal olmayan bir dinamik sistemde sistemin denge noktalarında kararlılığını belirlemek için her bir denge noktasına karşılık gelen özdeğerlerin bilinmesi gerekir. Denge noktalarında hesaplanan özdeğerlerin en az bir tanesinin reel kısmı pozitifse bu denge noktasında sistem kararsız davranış göstereceğinden kaos şartları oluşur.

Lorenz kaotik sistemde denge noktalarının hesaplanması için Jacobian matrisinin çıkarılması gerekir. Bunun için denklem (1) ile verilen Lorenz kaotik sistem denklemleri kullanılmıştır. Lorenz kaotik sistemine ait denklemden elde edilen denge noktaları bulunduğundan sonra Jacobian matris hesabı ile sistemin kararlılığı belirlenir. Lorenz sisteminde denge noktaları bulunurken \dot{x} , \dot{y} ve \dot{z} sıfır yapılarak sistemin doğrusallaştırılması yapılarak denge noktaları bulunur, ve

$$0 = \sigma(y - x),$$

$$0 = x(\rho - z) - y,$$

$$0 = xy - \beta z,$$

elde edilir. Bu denklem için denge noktaları $(0, 0, 0)$ ve $(\pm\sqrt{\beta(\rho - 1)}, \pm\sqrt{\beta(\rho - 1)}, \rho - 1)$ olarak bulunur. Bu denge noktaları ile öz değerler hesaplandığında sistemin kararlı olup olmadığı ve kaotik davranış karakteristiği belirlenebilir.

Sistemin Jacobian matrisi aşağıdaki gibidir.

$$J = \begin{bmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ \rho - z & -1 & x \\ y & x & -\beta \end{bmatrix}$$

İlk Olarak $(0, 0, 0)$ denge noktaları için Jacobian matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$J = \begin{bmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ \rho & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 10 & 0 \\ 28 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -8/3 \end{bmatrix}$$

Bu matrisin çözümünden $\lambda_1 = -22.8277$, $\lambda_2 = -2.667$ ve $\lambda_3 = 11.8277$ olarak hesaplanır. Bu durumda öz değerlerden en az birinin reel kısmı pozitif olduğundan sistem $(0, 0, 0)$ denge noktasında kaosa girer.

$(6\sqrt{2}, 6\sqrt{2}, 27)$ denge noktaları için Jacobian matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$J = \begin{bmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ \rho - 27 & -1 & 6\sqrt{2} \\ 6\sqrt{2} & 6\sqrt{2} & -\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 10 & 0 \\ 1 & -1 & 6\sqrt{2} \\ 6\sqrt{2} & 6\sqrt{2} & -8/3 \end{bmatrix}$$

Bu matrisin çözümünden $\lambda_1 = 8.973$, $\lambda_2 = -11.320 - 5.687i$ ve $\lambda_3 = -11.320 + 5.687i$ olarak hesaplanır. Bu durumda öz değerlerinden en az birinin reel kısmı pozitif olduğundan sistem $(6\sqrt{2}, 6\sqrt{2}, 27)$ denge noktasında kaosa girer.

$(-6\sqrt{2}, -6\sqrt{2}, 27)$ denge noktaları için Jacobian matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$J = \begin{bmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ \rho - 27 & -1 & -6\sqrt{2} \\ -6\sqrt{2} & -6\sqrt{2} & -\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 10 & 0 \\ 1 & -1 & -6\sqrt{2} \\ -6\sqrt{2} & -6\sqrt{2} & -8/3 \end{bmatrix}$$

Bu matrisin çözümünden $\lambda_1 = 8.973$, $\lambda_2 = -11.320 - 5.687i$ ve $\lambda_3 = -11.320 + 5.687i$ olarak hesaplanır. Bu durumda öz değerlerden en az birinin reel kısmı pozitif olduğundan sistem $(-6\sqrt{2}, -6\sqrt{2}, 27)$ denge noktasında kaosa girer. Lorenz dinamik sistemine ait denge noktaları ve bu denge noktaları için hesaplanan öz değerler Tablo-1'de verilmiştir.

Tablo 1. Lorenz Sisteminin Farklı Denge Noktaları için Öz Değerleri.

No	Denge Noktası	Öz Değerler
1	(0, 0, 0)	$\lambda_1 = -22.8277, \lambda_2 = -2.667, \lambda_3 = 11.8277$
2	$(6\sqrt{2}, 6\sqrt{2}, 27)$	$\lambda_1 = 8.973, \lambda_2 = -11.320 - 5.687i, \lambda_3 = -11.320 + 5.687i$
3	$(-6\sqrt{2}, -6\sqrt{2}, 27)$	$\lambda_1 = 8.973, \lambda_2 = -11.320 - 5.687i, \lambda_3 = -11.320 + 5.687i$

2.8. 0/1 Test Yöntemi

0/1 testi, bir sisteme ait veri çıkışları kullanılarak sistem denklemleri olmadan doğrusal olmayan sistem davranışının hesaplanabildiği bir yöntemdir. Yapılan test çalışmasında üç şekilde kaos şartları belirlenir. Birincisinde K değerinin yakınsadığı değere bakılarak, ikincisinde ise p ve q öteleme değişkenlerinin faz-uzay gösteriminden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, üçüncüsünde ise M değerinin zaman eksenini boyunca gösterdiği karakteristikler ile kaos durumu belirlenir. Buna göre; K değeri 0'a yakın olduğunda sistem doğrusal bir davranış sergilerken, 1'e yakın değerler aldığı anda sistem kaotik davranış gösterir. K değeri hesaplanırken regresyon ve korelasyon yöntemi kullanılır. M değeri zaman ekseninde doğrusal bir davranış gösteriyorsa sistemde doğrusaldır, M değeri zaman ekseninde dağınık davranış sergiliyorsa kaotiktir. p ve q değerleri ise faz uzay gösteriminde düzensiz bir desen üretiyorsa sistem kaotik, düzenli bir desen üretimi varsa da doğrusal bir sistemi temsil etmektedir. 0/1 test şekilleri için aşağıda verilen denklemler kullanılarak K, M, p ve q değerleri hesaplanır.

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] \quad (4)$$

$$\theta(t) = ct + \int_0^t \phi(x(s)) ds, \quad (5)$$

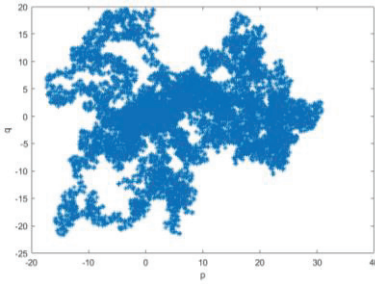
$$p(t) = \int_0^t \phi(x(s)) \cos(\theta(s)) ds, \quad (6)$$

$$q(t) = \int_0^t \phi(x(s)) \sin(\theta(s)) ds, \quad (7)$$

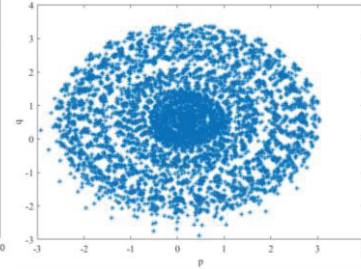
$$M(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [p(t + \tau) - p(\tau)]^2 d\tau, \quad (8)$$

$$K = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\log M(t)}{\log t} \quad (9)$$

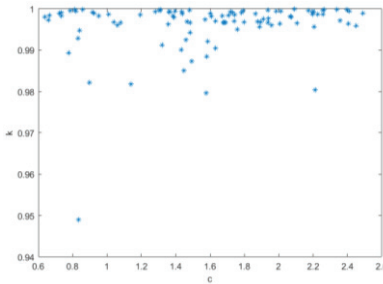
0/1 testi denklemleri MATLAB kullanılarak hesaplanmış ve aşağıdaki şekiller elde edilmiştir. Buna göre; Lorenz osilatörünün kaos davranış sergilediği $\sigma = 10$, $\rho = 28$ ve $\beta = 8/3$ parametre değerleri için, Şekil-9'da kaotik ve periyodik durumlar için hesaplanan; $p(n)$ ve $q(n)$ faz uzay gösterimleri, K-c grafiği ve $M(n)$ -t diyagramı verilmiştir. Burada; $p(n)$, $q(n)$, K asimptotik büyüklüğü, c $(0, \pi)$ aralığına seçilen rasgele sayıyı, $M(n)$ ortalama sapma ve t zamanı ifade etmektedir.



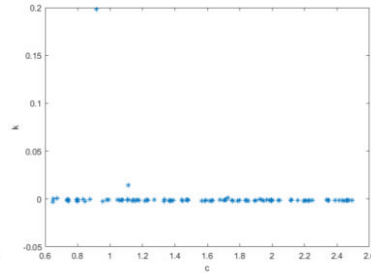
(a)



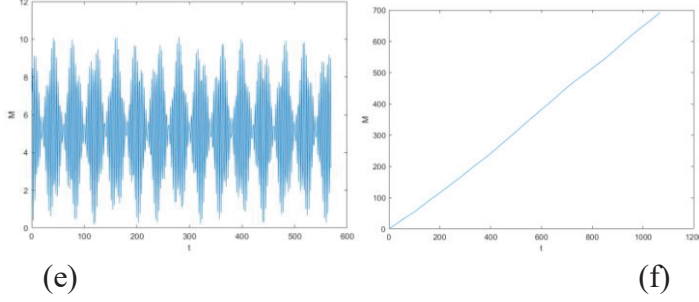
(b)



(c)



(d)



Şekil 9. 0/1 Test Analizleri (a) $p(n)$ ve $q(n)$ kaotik faz uzay gösterimi, (b) $p(n)$ ve $q(n)$ periyodik faz uzay gösterimi, (c) $K=1$ için kaotik grafiği, (d) $K=0$ için periyodik grafiği, (e) $M(n)$ - t kaotik diyagramı, (f) $M(n)$ - t periyodik diyagramı.

Şekil-9'daki 0/1 test analizleri incelendiğinde Lorenz dinamik sisteminin kaotik davranış sergilediği farklı grafiklerle ifade edilmiş ve Tablo 2'de kategorize edilmiştir.

Tablo 2. 0/1 Test Analizi.

Dinamik Yapı	$p(n)$ ve $q(n)$ dinamik yapıları	$M(n)$	K
Doğrusal	Sınırlı	Sınırlı	0
Kaotik	Yayıllı	Doğrusal	1

2.9. Diğer Dinamik Davranış Analizleri

Önceki başlıklarda açıklanan yöntemler kullanılarak dinamik sistemlerin kaos analizleri yapılırken bazı yöntemler ise kaotik sistemin karmaşık yapısını inceler. Bu analizlerde simetri analizi ile çatallanma ve korunum analizi ile çeker varlığı kontrol edilir. Çeker yapısını kontrolü ile kaotik sistemin karmaşıklığı ortaya konmaktadır. Buna göre korunumlu yapılar daha karmaşık karakteristik göstermektedir (Wang, 2021).

a) Simetri Analizi

Simetri kaotik sistemlerin dallanma karmaşıklığının kontrol edildiği bir analizdir. Buna göre; Lorenz denklemleri aşağıdaki eşitliklerle kontrol edilir.

$$(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, z)$$

Bu, dönüşümün Lorenz denklemlerine basit bir şekilde ikame edilmesiyle görülebilir,

$$\dot{x} = \sigma(y - x) \rightarrow -\dot{x} = \sigma(-y - (-x)) \rightarrow -\dot{x} = \sigma(-y + x) \rightarrow \dot{x} = \sigma(y - x)$$

$$\begin{aligned} \dot{y} = x(\rho - z) - y &\rightarrow -\dot{y} = -x(\rho - z) - (-y) \rightarrow -\dot{y} \\ &= -x(\rho - z) + y \end{aligned}$$

$$\dot{y} = x(\rho - z) - y$$

$$\dot{z} = xy - \beta z \rightarrow \dot{z} = (-x)(-y) - \beta z \rightarrow \dot{z} = xy - \beta z$$

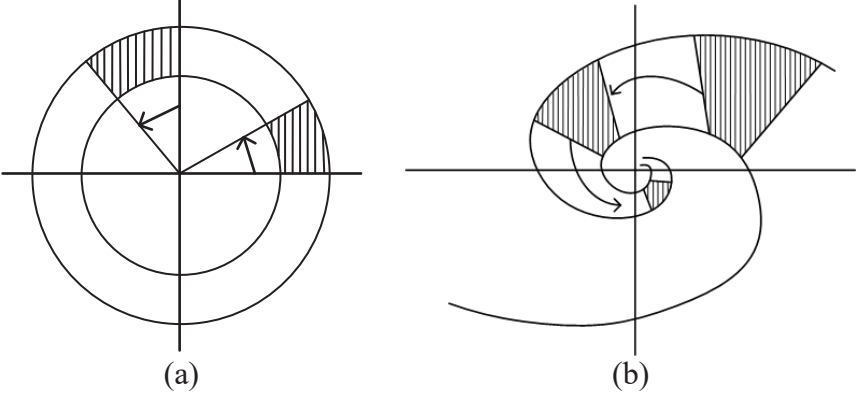
Lorenz dinamik sisteminin simetrik yapıda olması çatallanma ve kaotik pencere sayısının daha fazla olması anlamına gelmektedir.

b) Korunum Analizi

Dinamik sistemler, faz uzayında hacim değişimi olup olmamasına göre korunumlu (conservative) ve korunumsuz (dissipative) olmak üzere ikiye ayrılır. Korunumsuz bir kaotik sistem (Dissipative Chaotic Systems-DCS), başlangıç koşullarına duyarlı olan bir çekere sahiptir. Korunumsuz bir kaotik sistem (Conservative Chaotic Systems-CCS), ise herhangi bir çekere sahip değildir. Bu durum tam dereceli bir dinamik yapıya sahip olduğunu işaret eder.

Doğrusal olmayan sistemlerde her kaotik yapının bir çeker yapısı olmayabilir. Şekil-10 (a)'da korunumlu ve Şekil-10 (b)'de korunumsuz sistemlerin çeker yapıları tasvir edilmiştir. Bu çalışmada Lorenz kaotik sisteminin yapısı denklem (10) ile verilen kısmi türevlerin toplamının sıfırdan küçük olması şartıyla kontrol edilir.

$$\nabla V = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial z} < 0 \quad (10)$$



Şekil 10. Korunumlu ve korunumsuz sistemlerin çeker yapısı.

Buna göre denklem (1) ile verilen Lorenz dinamik sisteminin x , y ve z durum değişkenlerinin sırasıyla x , y ve z 'ye göre alınan kısmi türevlerinin toplamları denklem (11)'de bulunmuştur.

$$\nabla V = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial z} = -\sigma - 1 - \beta < 0 \quad (11)$$

ve burada $-\beta < \sigma + 1$ bulunur, devamında ise, $\sigma = 10$ ve $\beta = 8/3$ için eşitlik hesaplandığında Lorenz sistemi korunumlu olarak çalışır ve çeker oluşur.

3. Sonuçlar

Kaotik sinyaller, haberleşme sistemleri, kriptoloji ve sinyal işleme gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Kaos sinyallerinin başlangıç değeri ve parametre hassasiyeti kontrol edilebilirliğini de zorlaştırmaktadır. Çalışma karakteristiği ve kontrolü sağlanabilen kaos sinyallerinin güvenli haberleşme sistemleri başta olmak üzere sistemlerin uygulanabilirliğini artırmaktadır. Ancak kullanılan dinamik sistemin kaotik davranış sergilediği parametre aralıklarının ve şartlarının bilinmesi kullanılan bu sistemlerin işleyişi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle dinamik sistemlerin kaos sınır ve şartlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Lorenz dinamik sisteminin; Lyapunov üstellerine, Poincare kesit gösterimine, güç ve frekans spektrumuna, dallanma diyagramına,

zaman ve faz gösterimlerine, denge noktası ve kararlılık analizine, 0/1 test sonuçlarına, simetrik ve korunum analizlerine dair bilgiler verilerek örnekler gösterilmiştir. Özellikle, Lorenz sisteminin kaotik dinamik davranışını göstermek için sayısal simülasyonların yanı sıra teorik analiz de sunulmuştur. Çalışmada simülasyonlar, görsel grafikler ve kaotik sistemde başlangıç koşullarına duyarlılığı Matlab simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma kaos analiz yöntemlerinin dinamik bir sistem örneğinde açıklanması, analiz yöntemlerinin anlaşılması ve uygulanması açısından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Alpigini, J. J. (2004). Dynamical system visualization and analysis via performance maps. *Information Visualization*, 3(4), 271-287.
- Baker, G. L., & Gollub, J. P. (1996). *Chaotic dynamics: an introduction*. Cambridge university press.
- Bradley, E. (1999). Time-series analysis. *Intelligent Data Analysis: An Introduction*, Springer.
- Bradley, E., & Kantz, H. (2015). Nonlinear time-series analysis revisited. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 25(9), 097610.
- Chen, C. (2004). *Information visualization: Beyond the horizon*. Springer Science & Business Media.
- Holmes, P. (1990). Poincaré, celestial mechanics, dynamical-systems theory and “chaos”. *Physics Reports*, 193(3), 137-163.
- Lorenz E. N., 1963. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the atmospheric sciences*, 20(2):130-141.
- May, R. M. (1976). Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261, 459-467.
- Moon, F. C. (1987). Chaotic vibrations: an introduction for applied scientists and engineers. *Research supported by NSF*.
- Ott E., Grebogi C., Yorke J. A., 1990. Controlling chaos. *Physical review letters*, 64(11):1196.
- Özer, Ş., & Zorlu, H. (2012). Doğrusal Olmayan Par Sistemler Kullanılarak Kaotik Zaman Serisi Kestirimi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 27(2).
- Packard, N. H., Crutchfield, J. P., Farmer, J. D., & Shaw, R. S. (1980). Geometry from a time series. *Physical review letters*, 45(9), 712.
- Strogatz, S.H., (1994), *Nonlinear Dynamics and Chaos, With Applications to Physics, Biology and Engineering*, Perseus Books Publishing, USA.
- Su, K. (2015). Dynamic analysis of a chaotic system. *Optik*, 126(24), 4880-4886.
- Szemplinska-Stupnicka, W. (2003). *Chaos, Bifurcations and Fractals Around Us: A Brief Introduction* (Vol. 47). World Scientific.

- Wang, S. F., & Xu, D. (2017). The dynamic analysis of a chaotic system. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Wang, T. (2021), Classification of Chaotic Behaviors in Jerky Dynamical Systems, *Complex Systems*, 30(1), pp. 93–110.
- Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., & Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 16(3), 285-317.

Bölüm 2

POLYESTER ELYAF ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE GENEL BİR BAKIŞ¹

Öznur ÖZDİNÇ

¹ Öğr. Gör. Öznur Özdiñ, Gaziantep Üniversitesi, Naci Topçuođlu Meslek Yüksekokulu,
Orcid No: 0000-0002-6562-408X

GİRİŞ

Kimyasal polimerlerden üretilen ve doğal kaynağa sahip olmayan elyaf; sentetik lif olarak adlandırılmaktadır. Tekstil sektörü içerisinde oldukça büyük bir öneme sahip olan polyester elyafı ise bu alanda en çok kullanılan sentetik elyaftır. Polietilenteraftalattan eriyikten elyaf çekme yöntemi ile üretilen polyester; yüksek buruşmazlık özelliği, kolay temizlenebilme özelliği, düşük rutubet emme özelliği, kimyasallara karşı dirençli olması, güve dayanımının olması, küflenme dayanımının olması, alerjik olması, iyi boyut stabilitesi, uzun ömürlü olması, yumuşak tutumlu olması gibi özelliklere sahiptir (Çirkin 2006).

Günümüzde endüstride en çok kullanılan malzeme olan polyester yeni teknolojiler sayesinde en önemli polimerlerden birisi haline gelmiştir.

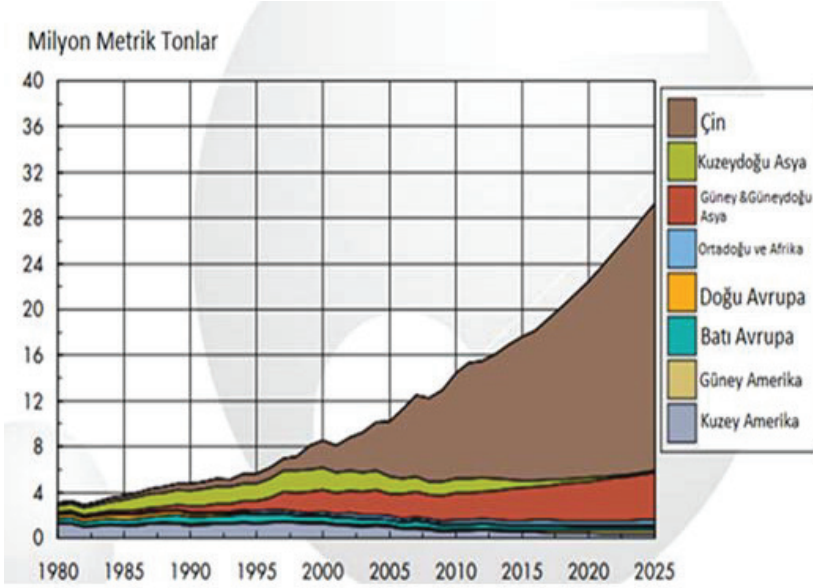
Bu çalışmada sentetik elyaf pazarının hâkimi durumunda olan polyester elyaf irdelenmiştir. Polyester elyafının üretimi, üretim sırasında elyafın özelliğini etkileyen parametreler ve tekstilde en fazla kullanım alanı bulan polyester elyafın özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

POLYESTER ELYAF

Tekstil sanayisine göz attığımızda farklı hammadde kullanılarak birbirlerinden farklı yapı ve karakterlere sahip iplikler üretilmekte olduğunu görmekteyiz. Bu elde edilen ipliklerden de farklı yapı ve karakterlere sahip tekstil materyalleri üretilmektedir. Özellikle, Sanayi devriminden sonra yapay lif üretimi başlamış ve dolaylı olarak da lif çeşitliliğinde artışların da başlaması ile birlikte tekstil sanayisinde de hammadde çeşitliliği artmıştır. Sanayi devrimine kadar olan süre içerisinde tekstil hammaddesi olarak sadece doğal elyaf kullanılmış olup Sanayi devriminden sonra birçok alanda olduğu gibi tekstil sektöründe yenilikler yaşanmıştır.

Sentetik elyaf, kimyasal polimerler kullanılarak elde edilen yapay elyaf grubudur. Dünyada ve Türkiye’de en çok kullanılan sentetik elyaf ise polyester elyaftır. Bu nedenlerden ötürü polyester elyafın gelişimi ve polyester elyaf üzerine birçok çalışmaya rastlanabilmektedir (Qin, 2014).

Nüfusun artması ile birlikte dünyada ve Türkiye’de tekstil tüketimi ve tekstil üretimi artmıştır (Anabal, 2007). Şekil 1’de dünyadaki toplam elyaf üretiminin değişimi görülmektedir. 2025 yılına kadar yapılmış olan istatistiklerde, toplam elyaf üretiminin her yıl %3,7 artış göstereceği öngörülmektedir (Wang, 2006).



Şekil 1 Dünya toplam elyaf üretimi (Wang, 2006).

2014 yılı dünya elyaf tüketimi 89,4 milyon ton olarak gerçekleşmiş ve bu tüketimin büyük kısmının sentetik liflerin oluşturduğu bilinmektedir. Dünya’da polyester elyaf üretimi ve polyester üretim teknolojileri konusunda Çin önde gelen ülkelerden birisidir (Qin, 2014).

Her geçen yıl poliester lif üretim miktarları artarak dünya lif üretiminin yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Günümüzde poliester lifleri; giyim, ev tekstili, kompozit malzemeler, teknik tekstiller gibi farklı birçok alanda kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak da poliester elyafından beklenen özellikler de her geçen gün artış göstermektedir. 2050 yılında Polyester elyaf başta olmak üzere sentetik lif üretiminde görülen bu hızlı artışın 50 milyon tonu aşması beklenmekte ve buna ilave olarak ise dünya lif üretiminin %80’ini sentetik liflerin oluşturacağı öngörülmektedir (Tarakçıoğlu, 2002).

Polyester lifinin dünyada bu kadar talep görmesinin nedenleri;

- Polyester liflerinin aşınma, gerilme ve çekmeye karşı gösterdiği yüksek mukavemet,
- Çoğu kimyasal madde ve çevre koşullarına karşı dayanıklı olmasıdır.

Polyester lifinin bu avantajlı özelliklerinin yanı sıra dezavantajlı özel-

likleri de bulunmaktadır. Özellikle hidrofob yapıya sahip olması sebebi ile polyester lifi ile elde edilmiş tekstil materyallerinin yaş terbiye işlemlerinin uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca bu özellik nedeni ile kullanım esnasında konfor hissi azalmaktadır (East, 2005).

Polyester için ilk ticari üretim ise 1941-1942 yılında Pittsburgh Plate Glass Şirketi tarafından olmuş ve ilk doğru alifatik polyester 1930 yılında Carothers at Dupont, Amerika'da üretilmeye başlanmıştır (Ni, et al., 2002).

Du Pont Carothers firmasının Calico Printers Association Ltd. laboratuvarında çalışan J. R. Whinfield ve J. T. Dickson tarafından 1939'dan 1941'e kadar ki periyotta bu konuda yapılan araştırmalar sürdürülmüştür. Polietilenterefalat'tan (PET) yapılmış olan bu yapay life araştırmacılar tarafından "Terylene" adı verilmiştir.

Dünyada poliester elyaf üretimi yapan diğer firmalarda farklı ticari isimler vermişlerdir. Bunlar;

- İngiltere'de "Terylene", "Trevira", "Terlanka",
- ABD'de "Dacron", "Fostel",
- Batı Almanya'da "Diolen" ve "Trevira",
- İtalya'da "Terital",
- Fransa'da "Tergal",
- Hollanda'da "Terlanka",
- Japonya'da "Tetoran"
- Türkiye'de "Perilen", "Lalelen", "Polylen" (Uğur, 2004)

POLYESTER ELYAFININ KİYASAL YAPISI

Sentetik lif grubunda oldukça önemli bir yere sahip olan polyester elyaf polyester elyaf; glikol ile difonksiyonel karboksilik asitlerin polikondenzasyon reaksiyonu ile elde edilmektedir. Farklı çeşit dialkol ve diasitlerin kombinasyonu sonucunda çok fazla çeşitte polyester üretmek mümkündür. İlk polyesteri İsveçli kimyager Jons Berzelius (1847) tartarik asit ve gliserol ile elde etmiştir (Feldman, 2007).

Genel formülleri Şekil 2'de görülmektedir. Bu uzun zincirde ester (-CO-O-) grupları çok sayıda tekrar etmektedir (Oğuz, 2016).



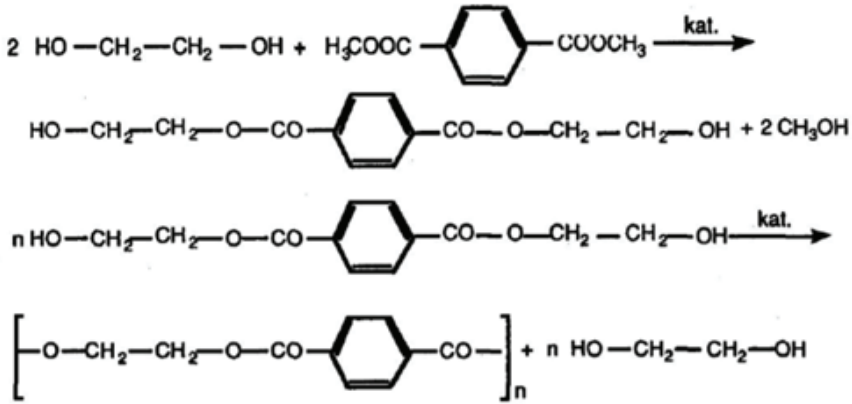
Şekil 2 Genel olarak Polyesterin Formülü (Öz, 2006).

Zincirde bulunan R ve R¹ alifatik yapıda ise, elde edilen polimerin erime noktası çok düşüktür. Bu sebepten dolayı da tekstil sanayisinde kullanılmamaktadır. Tekstil endüstrisinde kullanılabilen polimerlerin elde edilebilmesi için aromatik yapıya sahip bileşenler seçilmeli ve bu bileşenlere göre farklı yapıda poliesterler elde edilebilir (Başer, 2002).

Günümüzde yaygın olarak üretimi yapılan polyester lifleri, etilen glikolün tereftalik asit ile veya tereftalik asitin dimetil esteri ile polikondenzasyonundan elde edilen, polietilen-tereftalat lifleridir (Mangut, 2006).

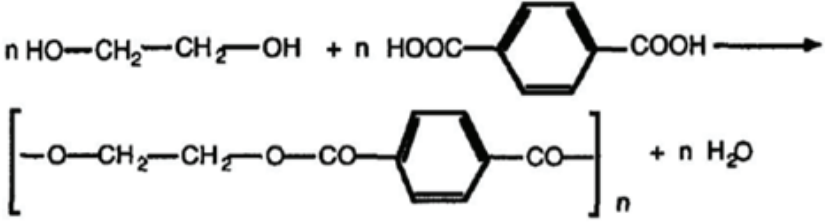
Polyester üretiminde, 2 farklı yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerdeki farklılık başlangıç maddelerinin farklı seçilmesinden kaynaklanmaktadır.

1. yöntem; bu yöntemde başlangıç maddesi olarak etilen glikol ve dimetil tereftalat kullanılmaktadır (Şekil 3) Etilen glikol ve dimetil tereftalat iki bileşen arasında ilk önce 200°C 'de katalizör etkisi ile bir ester değişimi, sonrasında da daha yüksek sıcaklıklarda katalizörün yardımı ile kondenzasyon meydana gelir. Bu yöntemde reaksiyon sonucunda metil alkol ortaya çıkar ve ortamdan uzaklaştırılır.



Şekil 3 Glikol ve dimetil tereftalat kullanılan polyester üretim yöntemi (Başer 2002)

2. yöntem; bu yöntemde başlangıç maddesi olarak tereftalik asit dimetil esterinin yerine doğrudan tereftalik asit kullanılmaktadır (Şekil 4). Bu yöntemde kullanılan bileşenler saf durumda olmalı aksi halde polimerleşme reaksiyonu istenilen yönde ilerlememektedir. Esterleşme reaksiyonlarında ayrılan su ve metil alkol ortamdan uzaklaştırılır. Ayrılan metil alkol yeniden tereftalik asit dimetilester yapımında kullanılabilir (Başer 2002).



Şekil 4 Etilen glikol ve tereftalik asidin kullanıldığı polyester sentezi (Başer 2002)

POLİESTER LİFLERİNİN ELDE EDİLMESİ

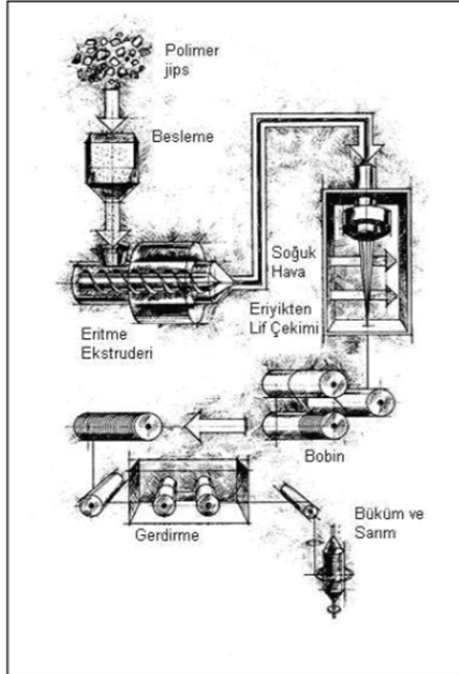
Polyester elyaf; eriyikten elyaf çekme yöntemi (yumuşak elyaf çekme yöntemi) ile elde edilir. Eriyikten elyaf çekme prosesi, polimerin eritilmesi ve elde edilen eriyiğin hava ile temas etmeden düzelerden ekstrüzyonu esasına dayanmaktadır. Bu adımları soğutma-katılaştırma ve sarım adımları takip etmektedir.

Bu elyaf üretim tekniğinde herhangi bir çözücü madde kullanılmadığı için, sentetik lif üretim yöntemleri içerisinde en basit olan yöntemdir (Koç ve Demiryurek 2004). Bu teknikte, katı haldeki polimerler (Şekil 5) besleme hunisine yerleştirilmekte ve ardından vidalı bir mile sahip olan ekstruder, buna bağlı dozaj pompası ve lif üretimi için gerekli deliklere sahip olan düzelere beslenmektedirler.



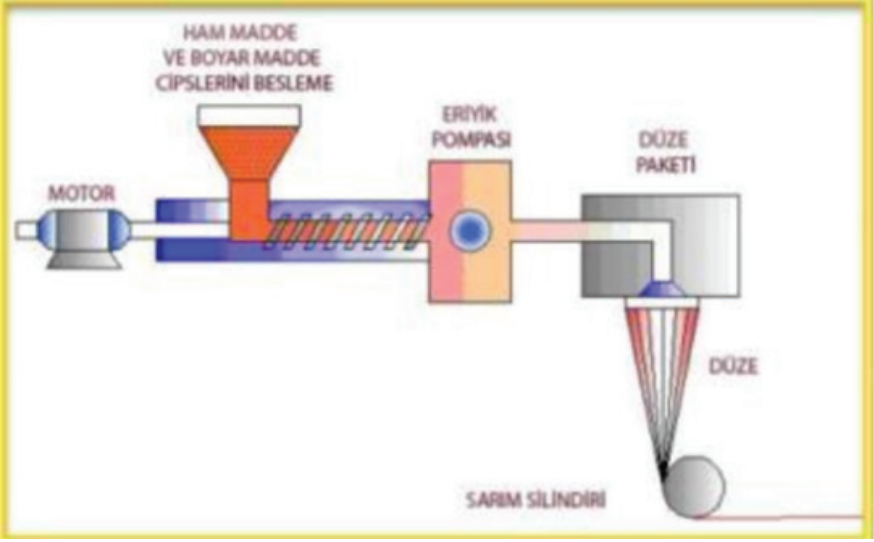
Şekil 5 Polyester polimer chipsi

Ekstruder, ana işlemin gerçekleştiği bölümdür. Bu bölümde katı haldeki polimerler, yüksek erime ve homojenlik sağlayan ekstruderler aracılığı ile eritilir ve basınçlandırılır. Şekil 6'da eriyikten lif üretim tekniğinin işlem akışı verilmiştir.



Şekil 6. Eriyikten lif çekimi ve işlem akışı (www.fibersource.com/)

Eriyikten elyaf üretimi sırasında, ipliğe farklı özellikler kazandırmak ve boyalı iplik elde etmek amacı ile ekstrudere chips ile birlikte katkı maddesi eklenmesi gereklidir. Ekstruder içerisine polimer chipsi ile birlikte, belirli bir oranda katkı maddesi eklenip karıştırılırsa elde edilecek filament katkılı olarak elde edilecektir. Ekstrudere eklene katkı maddesi boyar madde veya ipliğe istenilen özelliği kazandırmak amacı ile eklenecek yardımcı bir kimyasal madde olabilir (Kozanoğlu 2006). Şekil 7'de eriyikten lif üretim tekniği esnasında katkı maddesinin eklendiği düzenek gösterilmiştir.



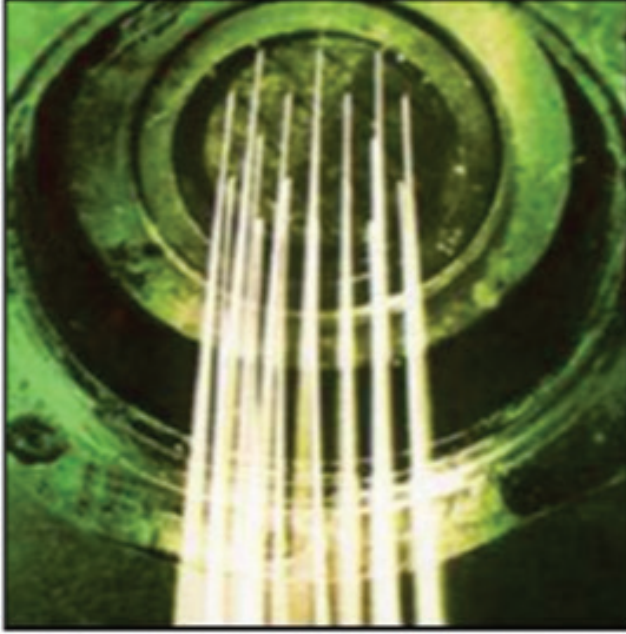
Şekil 7. Eriyikten lif üretiminde katkı maddesi eklenmesi (Kozanoğlu 2006)

Tek bir ekstruder borular vasıtası ile birçok üretim hattını polimer eriyiği ile besleyebilir. Ekstruderde elde edilen polimer eriyiği direkt olarak dağıtım borularına beslenir. Buradan da ilk olarak dozaj pompasına iletilirler. Pompanın görevi belli basınçta polimeri düzeye iletmektir (Rang-kupan, 2002).

Polimer eriyiği düzeye geçmeden önce filtreden geçirilmelidir. Böylece eriyik içerisinde olabilecek parçacık, jel gibi yabancı maddelerin ayrılması gerçekleştirilir. Bu yabancı maddeler filtreler ile ayrılmadığı takdirde düze deliklerinin tıkanması ya da lifin içerisine yerleşmesi gibi problemlere neden olacaktır. Bu durum da daha sonra yapılacak işlemleri veya lifin kullanımı sırasında performansını negatif yönde etkileyecektir.

Filtrelerden süzülerek istenmeyen maddelerden temizlene polimer eriyiği, 20MP'a kadar basınç altında üzerinde düzelere gönderilir. Düzeye;

polimer eriyiđinin filament Őeklinde akmasını sađlayan kűçük çaplı deliklere sahip elemandır (Őekil 8). Dűzede bulunan delik sayısı ve dűze deliklerinin çapı lif őrretim hızını ve elde edilen lifin performansını belirlemektedir (Kozanođlu 2006).

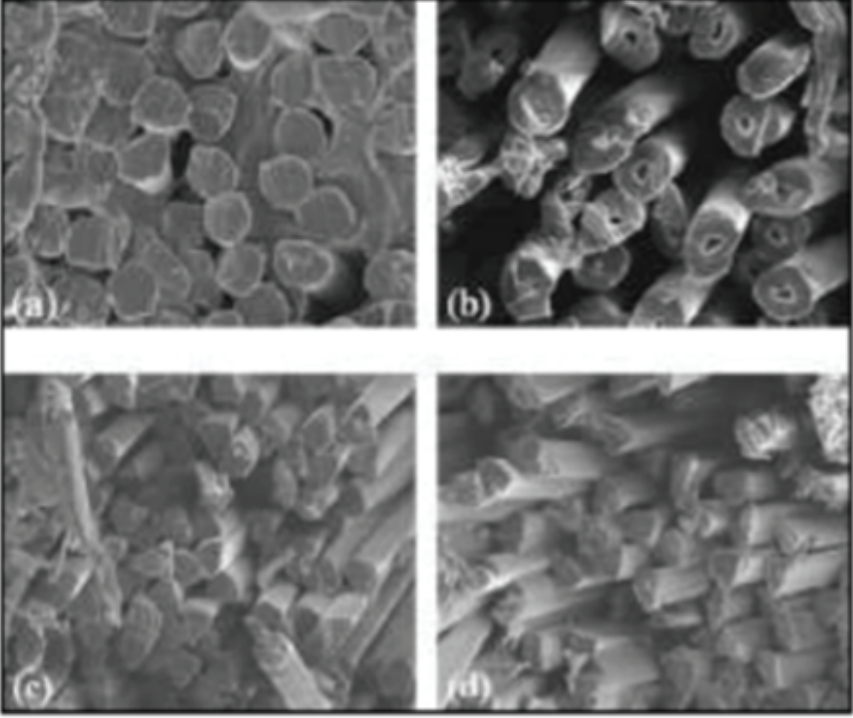


Őekil 8. Dűze sorasında lif oluŐumu (www.fibersource.com/)

Dűze deliđinin boyutu filamentin kalınlıđını, Őekli ise elde edilecek olan lifin őrzelliklerini belirlemektedir.

Liflere fonksiyonellik ve estetik őrzellik kazandırmak için yuvarlak olmayan kesite sahip sentetik liflerin geliŐtirilmesi 1960lı yıllarda baŐlamıŐtır. Bu amaç ile lif kesiti őren Őeklinde oluŐturulmuŐ ve bűylelikle çok pahalı olan parlak ipek lifine benzetme çalıŐmaları yapılmıŐtır. Gűnűműzde de çok parlak lif elde etmek için en çok tercih edilen lif kesit Őekli őren kesittir. (Takarada et al., 2001).

Lif Kesit Őekli dairesel olmayan lifler; sűrtűnme katsayısı, yumuŐaklık, parlaklık, konfor, bocuklanma, tutum, hacim gibi őrzellikler bakımından farklı performanslar sergilemektedir. Lif Kesit Őekli dairesel olmayan bazı lifler Őekil 9'da verilmiŐtir.



Şekil 9. Poyester Lifinin Enine Kesit Şekilleri

(A). Dairesel (B) Boşluklu Yuvarlak (C) Üçgen (D) Boşluklu Üçgen (Karaca Ve Özçelik, 2007)

Polimer eriyiği düzeden geçtikten sonra alım (sarıcı) silindirlerin uyguladığı çekim ile hızlandırılır ve böylece çekilerek inceltir. Bu işlem esnasında eriyik halindeki polimerin sıcaklığı da hızlı bir şekilde düşürülmelidir. Bunun için soğuk rutubetlenirilmiş hava kullanılır. Kontrollü bir şekilde filamentler üzerine havanın üflenmesi ile filamentlerin soğutularak katılaşması sağlanır. Soğutularak katılaştıran filamentler daha sonra bir kanal içine alınır ve filamentlerin birleşerek iplik oluşturduğu noktaya kadar dış etkilerden korunması sağlanır (Rangkupan, 2002).

İplik oluşu gerçekleşmesinin ardından, yağlayıcı, antistatik özellik kazandırıcı, mikrop öldürücü ve korozyon önleyici gibi maddelerin özel bir karışımı olan spin finish yağı ile iplik muamele edilir. Spin finish yağlayıcısında filamentlerin birbirlerine tutunmaları artar, kohezyon artar ve ipliğin kılavuzlar üzerinden geçerken meydana gelen sürtünme azaltılmış olmaktadır. İplik kohezyonu, ipliğin üretim sırasında ve daha sonrasındaki kullanım sırasında filamentlerin ayrılmasını önlemek açısından önemlidir. Statik elektriklenme iplik kohezyonunu kötü yönde etkileyeceği için

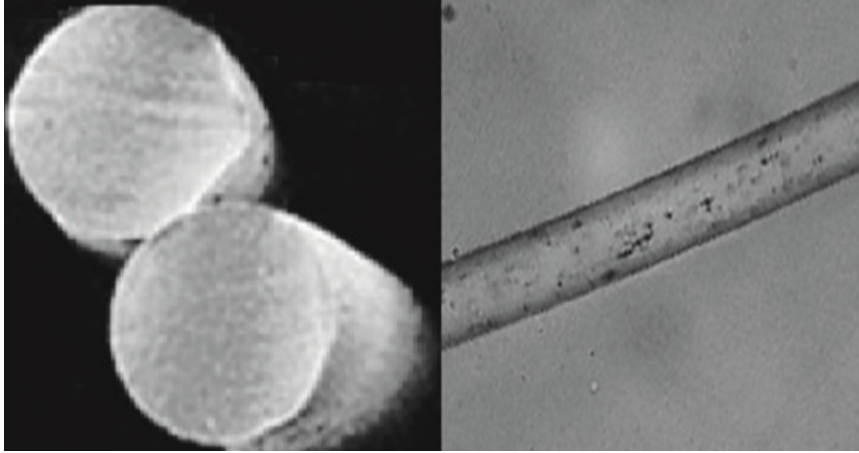
anti-statik özellikli bir spin finish yardımı ile bu durum kontrol altına alınabilir. Spin finish yağı saf halde veya su ile karıştırılarak, dönen bir silindirin yüzeyinde oluşturulan film tabakasının iplik ile teması ile veya bir kılavuzdan geçerken kılavuza dozajlanan yağ ile ipliğin temasa geçirilmesi ile ipliğe uygulanır (Kozanoğlu 2006).

Spin finish yağı uygulanmış polyester lifleri filament halinde kullanılacak ise direkt olarak bobinlere sarılır, stapel halinde kullanılacak ise filamentler bir araya getirilerek kablo yapılır ve gerdirilerek çekilir. İsteğe göre kıvrım verildikten sonra istenilen uzunlukta kesilir.

Üretim sırasında filament sarım hızı, üretilen filament ipliklerin fiziksel, mekaniksel ve iç yapı özellikleri üzerinde direkt olarak etkiye sahiptir. Sarım hızına bağlı olarak az yönlenmiş (LOY), orta derecede yönlenmiş (MOY), kısmen yönlenmiş (POY), yüksek derecede yönlenmiş (HOY), tamamen yönlenmiş (FOY)/tam çekimli (FDY) poliester iplikler üretilir (Bunsell, 2018).

POLYESTER ELYAFIN ÖZELLİKLERİ

- Polyester elyafın kesit şekilleri lif çekiminde kullanılan düzelerle göre değişiklik göstermektedir. Bu liflerin enine kesitleri genellikle yuvarlak, boyuna kesitleri ise pürüzsüz cam bir çubuğa benzer şekildedir (Besci, 2010).



(a)

(b)

Şekil 10. Polyester lifinin enine kesit (a) ve boyuna (b) SEM görüntüsü (Uysaltürk, 2013).

- Polyester elyaf; kontinü filament ve kesik elyaf şeklinde üretilebilir (Öz, 2006),
- Tekstil uygulamalarında kullanılan polyester polimerinin ortalama molekül ağırlığı 15.000-20.000 g/mol arasındadır (Scheirs, 2003).
- Polyester elyaf inceliği; kullanım yerlerine göre 1,2 denyeden 20 denyeye kadar üretilebilirler (Öz, 2006).
- Polyester elyaf çok yüksek mukavemet derecesine sahiptir. Filament poliester liflerinin mukavemeti 4–7 gr/denye, kesikli liflerin mukavemeti ise 4-5 g/denye'dir (Başer, 2002),
- Özgül ağırlığı 1,36-1,45 g/cm³ arasındadır (Başer, 2002),
- Yüksek kristalin bölge oranı nedeni ile nem çekme özelliği çok düşüktür (% 0.4) (Başer, 2002),
- Poliester elyafın hidrofobik karakterli yapısı nedeni ile hızlı kuruma gibi bir özelliğe sahiptir. Polyesterden üretilen tekstil materyalleri kolay yıkanır ve kolay kurur (Dominguez et al., 2002)
- Olağanüstü derecede yumuşaklık ve renk netliği sağlayan polyester tekstil mamullerinin temizlemesi kolaydır, lekeye ve solmaya karşı doğal olarak dirençlidir.
- Polyester lif üretimi sırasında lif mukavemetini artırmak için germe-çekme işlemi yapılmaktadır. Böylece liflerin kimyasal reaktiflere karşı dayanım artar. Bu yüzden lifler zayıf asitlere karşı soğukta ve sıcakta oldukça dayanıklıdırlar. Fakat kuvvetli anorganik asitlerden yüksek sıcaklıkta etkilenirler (Başer, 2002),
- Polyester lifi; yapısında bulunan benzen halkaları ve H köprüler SEBEBİ İLE oldukça sıkı bir yapı sergilemektedir. Bu sebeple polyester lifleri bazlara karşı dayanıklıdırlar. Sabun ve deterjanlardan etkilenmezler. Fakat yoğun bazik çözeltiler karşısında dayanıklılıkları sınırlıdır (Yalçın, 2011).
- Polyester elyaf mükemmel gerilme ve elektriksel özelliklere sahip kristal termoplastiklerdir. (Akgün, 2015).
- Yüksek sıcaklığa dayanıklıdırlar. Fakat 200°C sıcaklığın üzerinde uzun süre muamele görürlerse zarar görebilirler (Babaogul, Şener ve Öztop; 2010).
- Rezilyans (yaylanma) özelliği yüksektir.
- Polyester elyafı sert bir tuşeye sahip olduğu için bükülme ve kırılmaya karşı direnç göstermektedir. Bu nedenle polyester elyafından

elde edilen tekstil materyalleri buruşmazlık özelliğindedir. Bu özellik de polyester elyaf için kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

- Polyesterin yapısında bulunan metilen grupları ile benzen halkaları sebebi polyester tekstil materyalleri mumsu tuşeye neden olmaktadır (Başer, 2002),

- Polyester tekstil mamüllerinde statik elektriklenme ve tüylenme problemi görülebilmektedir.

- Orta ağırlıklığa sahip olan polyester elyaf esnektir ve uzun ömürlüdür.

- Polyester elyafı oldukça temiz ve beyaz elyaf olduğu için polyesterde ağırtma nadir yapılan bir işlemdir.

- Polyesterin yapısındaki bağların kırılma noktası (1. camsı geçiş) 80-90°C, 2. camsı geçiş sıcaklığı 125°C, yumuşama noktası 230°C, erime noktası ise 260°C'dir (<http://www.tekstildershanesi.com.tr/>).

- Polyester lifleri boyarmaddelerle kimyasal reaksiyona girmedikleri için bu tür ürünlerin boyanması, dispersiyon boyarmaddeleri ile veya suda çok az çözünürlüğü olan boyarmaddeler vasıtası ile yapılabilir.

- Polyester kuvvetli asitlere karşı oldukça dayanıklıdır. Ancak süre ve konsantrasyona bağlı olarak dayanımında azalma görülebilir (Yüce, 2010).

POLYESTER KULLANIM ALANI

Yapısında ester bağı bulunduran polyester elyaf; yüksek mukavemet, orta dereceli uzama, yüksek camsı geçiş sıcaklığı, deformasyona ve kimyasallara karşı iyi dayanım gibi özellikleri nedeniyle kimyasal lif veya plastik yapımında kullanılmakta olan polyester elyaf hem konvansiyonel hem de endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Scheirs, 2003).

Polyester elyaf inşaat, otomotiv, denizcilik, paketleme, mobilya veya tekstil gibi hayatımızın çeşitli bölümlerinde kullanılmaktadır.

Polyester elyaf; yapay elyaf grubu içerisinde en yüksek mukavemet / ağırlık oranına sahip olduğu için ticari kullanımda özellikle de tekstil sanayisinde çok başarılı olmuştur. Tekstilde; iç giyim, dış giyim, çorap ve ev tekstili gibi birçok üründe sıklıkla tercih edilen bir elyaf olmuştur.

Poliester; makine halı sanayisinde de en çok kullanılan elyafların başında gelmektedir. Poliester elyafların boyanmasının çok zor olması sebebi ile fazla önem verilmemiş ancak daha sonraları yeni boyama metotların geliştirilmesi ile birlikte bu alanda da önemli gelişmeler kaydedilmiştir (Teker ve Karaca, 2005).

Ayrıca polyesterin rutubeti emme oranı diğer elyaflara göre çok daha düşüktür ve aynı zamanda su bazlı lekelerle karşı da oldukça dirençli olması sebebi ile dış mekânlarda kullanılan halılar için rahatlıkla tercih edilebilir.

Tekstil endüstrisine baktığımızda pamuk ile polyester elyafının karıştırılarak sıklıkla kullanıldığını görmek mümkündür. Böylelikle kumaşın geri dönme özelliğinde de göz ile görülür derecede bir iyileşme sağlanmaktadır. Polyester ve pamuk elyaf karışımları kadın – erkek giyiminde, yatak ve masa takımları gibi ev tekstilinde çok çeşitli amaçlar için de kullanılmaktadır. Bu kullanım amaçları için belirlenmiş ipliklerin numarası genellikle 15 tex ile 67 tex arasında yer alır (Karaaslan, 2005)

Polyester elyaf elastikiyeti ve hızlı kuruma özelliği ile dolgu malzemesi olarak da kullanım alanı bulmaktadır (Karaaslan, 2005)

Tekstilde için yapılan araştırmalarda polyester için en iyi değerler %100 polyester kullanıldığı zaman elde edilmiş olup karışımdaki pamuk oranının artması ile birlikte düzgünsüzlük, ince yer, kalın yer ve neps değerlerinin kötüleştiği gözlemlenmiştir (Topalbekiroğlu, Çoruh, İnce, Kaynak, 2007).

KAYNAKLAR

- Akgün, A., M. (2015). Reinforcement Of Polyesters By Boron Minerals. A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, Sayfa;1.)
- Anabal, F. Y. (2007). Yüksek Lisans Tezi. PET Atıkların Endüstride Değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Turkey.].
- Babaoğul, M., Şener, A., ve Öztop, H., (2010). Tekstil lifleri. Ankara: Gazi Kitabevi
- Başer, İ., (2002). Elyaf bilgisi. Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Yayın No: 21
- Besci, S. (2010). Hava-jet tekstüre sistemi ile üretilen polyester/polyester ve polyester/teflon dikiş iplikleri özelliklerinin analizi. Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Mayıs, 2010 Uşak, Sayfa 21.
- Bunsell, A. R., (2018). Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres, The Textile Institute Book Series, Woodhead Publishing, Kidlington, United Kingdom.
- Çirkin, S. (2006). Yalancı Büküm Tekstüre İşleminde Tekstüre Değişkenlerinin İplik Özellikleri Üzerindeki Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, ÇÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Adana.
- Dominguez-Rosado, E., Liggat, J. J., Snape, C. E., Eling, B., & Pichtel, J. (2002). Thermal degradation of urethane modified polyisocyanurate foams based on aliphatic and aromatic polyester polyol. Polymer Degradation and Stability, 78(1), 1–5.
- East, A. J., (2005). Polyester Fibers, 95-166, Synthetic Fibres; Nylon, Polyester, Acrylic, Polyolefin, McIntyre, J. E. (Ed.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 320p.
- Feldman, J. M. (2007). The managerial equation and innovation platforms: The case of Linköping and Berzelius Science Park. European Planning Studies, 15(8),
- <http://www.fibersource.com/f-tutor/techpag.htm>
- <http://www.tekstildershanesi.com.tr/bilgi-deposu/poliester-pes.html>
- Karaaslan U., (2005). Polyester Lif ve Özellikleri. Tekstil Maraton Dergisi, Sayfa:37-40, Eylül-Ekim.
- Karaca, E., Ozcelik, F., (2007). Influence of the cross-sectional shape on the structure and properties of polyester fibers. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 103, 2615–2621
- Koç E. ve Demiryurek O., (2004). Sentetik Lif Üretim Esasları Ve Tekstilde Ekstrüzyon İşlemi, Tekstil Teknoloji, 100-118.

- Kozanoğlu, G. (2006). Elektrosinning yöntemiyle nanolif üretim teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mangut, M. (2006). %100 Polyester Ve %100 Pamuklu Dokuma Kumaşların Tekrarlı Yıkama Ve Ütüleme İşlemleri Sonrasında Yüzey Renk Özelliklerinde Ortaya Çıkan Değişmelerin İncelenmesi. T.C. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- Ni, H., Daum, J. L., Thiltgen, P. R., Soucek, M. D., Simonsick, W. J., Zhong, W., & Skaja, A. D., 2002: Cycloaliphatic polyester-based high-solids polyurethane coatings: II. The effect of difunctional acid. Progress in Organic Coatings, 45(1)
- Oğuz, İ. (2016). Poliester Kumaşların Dispers Boyarmaddelerle Boyanmasına Ve Haslıklarına Düşük Sıcaklık Plazma İşlemlerinin Etkilerinin Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Nisan, İzmir).
- Öz, M.,K. (2006). Yanmaya Karşı Dirençli (FR) Ve Katyonik Boyalarla Boyanabilen (CD) Polyester Üretimi Ve Bu Polyesterin Elyaf Prosesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- Qin, Y. (2014). Global Fibres Overview, Synthetic Fibres Raw Materials Committee Meeting at APIC, Pattaya, Thailand.
- Rangkupan, R. 2002. Electrospinning Process of Polymer Melts, PhD Thesis, The Graduate Faculty Of The University Of Akron.
- Scheirs, J., (2003). Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters, Wiley Series in Polymer Science, John Wiley & Sons, Sussex, England.
- Takarada, W., Ito, H., Kikutani, T. (2001). Studies On High-Speed Melt Spinning Of Noncircular Cross- Section Fibers. I. Structural analysis of as-spun fibers Journal of Applied Polymer Science, Vol. 80, 1575–1581
- Tarakçıoğlu I. (2002). Türk ve Dünya Tekstili, SASA-DupontSA 10. Polyester Günleri, DupontSA-SASA, 13-14 Aralık, Mersin.
- Teker M., karaca, H. (2005). Polyester Elyafın Etilen Glikollü Ortamda Dispers Boyarmaddelerle Boyanması. SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 9.Cilt, 1.Say1, Sayfa 30).
- Topalbekiroğlu, M., Çoruh, H.E., İnce, M.E., Kaynak, H.K. (2007). Pamuk/ Poliester Ve Pamuk/ Akrilik Karışım O. E. Rotor İpliklerinde Karışım Oranının İplik Kalite Değerlerine Etkisi. Tekstil ve Konfeksiyon, Yıl: 2007Cilt: 17Sayı: 2, Sayfa 104 - 109
- Uğur, Ş.S. (2004). Poliesterin Dispers Boyarmaddelerle Boyama Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.

- Uysaltürk, D. (2013). Viloft/Pamuk ve Viloft/Polyester Karışımı İplik Özelliklerinin ve Örne Kumaş Termofizyolojik Konfor Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (185s.).
- Wang, Y. (2006). Chapter 1. Introduction, in “Recycling in Textiles”, Ed. Wang Y., Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, UK.
- Yalçın, Y. (2011). Boyanmış Poliester Kumaşlarda Bazı Renk Haslıklarının Değişim Kinetiğinin Renk Ölçümleri ile Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa
- Yüce, İ. (2010). Poliester/Yün İplik Karışımlarının Boyanması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Eğitimi Ana Bilim Dalı Tekstil Eğitimi Programı

Bölüm 3

BİYOGAZDAN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİNİN İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Canan GÖREKE¹

Şükrü KİTİŞ²

Yusuf YALÇIN³

¹ Canan GÖREKE; İş Sağlığı ve Güvenliği, Tezsiz Yüksek Lisans, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya. gorekecanan@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3237-3007

² Dr. Öğr. Üyesi Şükrü KİTİŞ; Simav Teknoloji Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya. sukru.kitis@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-3302-3359

³ Yusuf YALÇIN; Kayseri Biyogaz Tesisi, Kapadokya OSGB (Ortak Sağlık ve Güvenlik Birliği), Aksaray.

*İlgili yazar / Corresponding author: gorekecanan@gmail.com

1.GİRİŞ

Çevresel açıdan bakıldığında her doğal kaynak kullanımı sırasında ve sonrasında çevreye atılan veya bırakılan ya da atılması zorunlu olan atıkların doğru bir şekilde tanımlanması ve yönetilmesi gerekmektedir. Atık yönetimi ile sağlanan bu gereklilik sırasıyla atığın;

- Oluşumunun önlenmesi
- Kaynağında azaltılması
- Yeniden kullanılması
- Özelliğine ve türüne göre ayrılması
- Biriktirilmesi ve toplanması
- Geçici depolanması, taşınması ve ara depolanması
- Geri dönüşümü, enerji geri kazanımı dâhil geri kazanılması ve bertarafı
- Bertaraf işlemleri sonrası izlenmesi, kontrolü ve denetimi

faaliyetleri yürütülerek gerçekleştirilmektedir(Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015).

Küresel ısınma dâhil birçok çevresel problemin etkisini azaltan atık yönetimi; 02.04.2015 tarih ve 29314 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan “Atık Yönetimi Yönetmeliği” kapsamında yapılması zorunlu bir uygulamadır. Atık Yönetimi Yönetmeliği’nde tehlikeli atık olarak adlandırılan atıklar diğer atık türlerine göre çevre ve insan sağlığının korunması için önleme, azaltma, tekrar kullanım, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve bertaraf gibi önemli tedbirlerin alınmasını gerektirmektedir (Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015). Bu tedbirlerden enerji geri kazanımı; dünyada ve ülkemizde nüfus artışı ve dolayısıyla yaşam standardının artması sonucu oluşan çevresel problemlerde oldukça etkin bir yöntemdir. Nüfus ve yaşam standardının artması; sanayi ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılmakta olan fosil yakıt kaynaklarının kullanımını da arttırmaktadır. Ancak fosil yakıt gibi doğal kaynakların aşırı kullanımı sonucu oluşan CO₂, Metan, NO ve CFC v.b. zararlı gazların havayı kirletip başta küresel ısınma olmak üzere birçok çevresel probleme sebep olmasından dolayı çevreye verilen zararın önlenmesi, sürdürülebilir ve çevre dostu olması açısından yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları doğada kendiliğinden üretilmektedir ve fosil kökenli yakıtların tersine sınırsızdır. Fosil yakıtlar küresel ısınma ile birlikte asit yağmurlarına, hava, su ve toprak kirliliğine yol açarken, yenilenebilir enerji kaynakları doğal süreçler sonunda ortaya çıkması nedeniyle fosil kaynakların sebep olduğu çevresel

sorunların azalmasında oldukça büyük bir öneme sahiptir (Akkurt ve Oğuz, 2017:363).

Atıklardan enerji geri kazanımı yoluyla faydalanmak, asıl kaynağa olan talebin ve bertaraf edilecek atık miktarının azaltılmasında önemli bir faktördür. Atıklar fiziksel, biyokimyasal veya kimyasal metotlar ile bileşenlerine ayrılır ve enerjiye çevrilir. Enerji geri kazanımlarından bir tanesi hayvansal veya bitkisel kaynaklı organik atıkların anaerobik koşullarda parçalanması ile biyogaz üretilmesi ve nihayetinde biyogazın enerjiye dönüştürülmesidir (Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015). Biyometanizasyon ile düzenli depolanan ancak yeterli ve verimli bir şekilde geri kazanımını sağlayamayan organik atıkların yenilenebilir enerji kaynağı olmasını sağlayan yöntem; organik atıklardan biyogaz üretilmesi ve biyogaz üretimiyle açığa çıkan gazlardır (Yıldız, Saltabaş, Sezer ve Yağmur, 2009:2).

Biyogazın enerjiye dönüştürüldüğü tesisler; atık bertaraf tesislerinde organik atıklardan biyogaz üretiliyor olması sebebiyle Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın, içeriğindeki metan, karbondioksit, hidrojen ve çok az miktarda azot, su buharı ve hidrojen sülfür gibi gazların yenilenebilir enerji kaynağı olmasını sağlaması sebebiyle Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın, enerji üretimi sırasında oluşabilecek tehlikeler ve bu tehlikelerin yol açabileceği riskler sebebiyle ise Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı'nın ortak çalışma alanı olmasını sağlamaktadır.

1.1. Biyogaz

Biyogaz; organik atıklardan kullanılabilir gaz üretilmesidir. Başka bir ifade ile organik maddenin oksijensiz ortamda karbondioksit ve metan gazına dönüştürülmesidir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017). Atık Yönetimi Yönetmeliği'nde biyogaz; bitki ve hayvan atık/artıkları olarak tanımlanan organik atıkların ve yine aynı yönetmelikte tanımlanan biyometanizasyonu sonucu ortaya çıkan renksiz, kokusuz, havadan hafif ve parlak mavi bir alevle yanan bir gaz karışımı olarak ifade edilmektedir. Biyogazın bileşiminde, %50-70 değerinde metan gazı, %30-40 değerinde karbondioksit gazı, %5-10 değerinde hidrojen gazı ile birlikte azot(%1-2), su buharı(%0,3), hidrojen sülfür bulunur (Anaerobik çürütme, t.y.).

Biyometanizasyon; biyokütlenin anaerobik (oksijensiz ortamda) mikroorganizmalarla çürütülerek ayrıştırılması sırasında meydana gelen çok adımlı biyokimyasal reaksiyonlardan oluşan biyolojik bir süreçtir (Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015). Oksijensiz ortamda organik maddelerin mikro-organizmalar tarafından ayrıştırılmasına anaerobik çürütme denir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017). Anaerobik çürütmede mikroorganizmaların organik maddeleri metan gazına dönüştürmesi; anaerobik proseslerde karbon dönüşümü olarak da bilinen hidroliz, asit üretimi ve metan üretimi olarak üç aşamada gerçekleşmektedir (Anaerobik çürütme, t.y.). Hidroliz

aşamasında; organik atıklar, içindeki şekeri yiyerek yapılarında değişiklik meydana getiren ve yıkım reaksiyonlarını gerçekleştiren bakteriler tarafından uçucu organik maddelere dönüştürülmektedir. Sıcaklık, Ph ve çamur yaşı hidroliz aşamasını etkileyen etmenlerdir. Asit üretimi aşamasında; hidroliz aşamasında elde edilen uçucu organik maddelerin ikiden daha fazla yağ asidi oluşturan bakteriler tarafından organik asitlere dönüştürülmesi gerçekleşmektedir. Metan üretimi aşamasında ise hidroliz ve asit üretim aşamalarında üretilen ürünlerin, metan oluşturan bakteriler tarafından metana dönüştürülmesi sağlanmaktadır(Yıldız ve diğerleri, 2009:4).

Biyogaz üretiminde kullanılan organik atık/artıklar; hayvancılıkta elde edilen gübre ve diğer atıkları içeren hayvansal atıklar, yemek ve bahçe atıklarını içeren bitkisel atıklar ve orman, deri, tekstil ve gıda endüstrisi atıkları ile evsel katı atık ve atıksu arıtma tesisi atıklarını içeren endüstriyel atıklar olarak üç sınıfta incelenmektedir(Karaosmanoğlu, 2011).

Biyogazın kullanım alanlarını;

1. Isınma ve ısıtma için doğrudan yakma
2. Ulaşım için motor yakıtı elde etme
3. Elektrik üretimi için türbin yakıtı
4. Yakıt pilleri
5. Maliyetin düşürülmesi için doğalgaza karıştırma
6. Kimyasal maddelerin üretimi sırasında kullanılan biyogaz olarak sıralamak mümkündür(Karaosmanoğlu, 2011).

Biyogaz; organik atıklardan elde ediliyor olması ve kullanım alanları açısından değerlendirildiğinde çevreye karşı duyarlı bir enerji kaynağı olup, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında çevresel ve ekonomik boyutta birçok avantaja sahiptir(Karaosmanoğlu, 2011).

1.2. Biyogazdan Elektrik Enerjisi Üretilmesi

Türkiye’de, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın 10.05.2005 tarihli 5346 no’lu “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun’unda; rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, biyogaz, dalga, akıntı enerjisi ve gel-git ile kanal veya nehir tipi veya rezervuar alanı on beş kilometrekarenin altında olan hidroelektrik üretim tesisi kurulmasına uygun elektrik enerjisi üretim kaynakları, yenilenebilir enerji kaynakları olarak ifade edilmektedir. Biyokütle enerjisi ise organik atıkların yanında bitkisel yağ atıkları, tarımsal hasat atıkları da dahil olmakla birlikte, tarım ve orman ürünlerinin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen katı, sıvı ve gaz halindeki yakıtları oluşturmaktadır(Yıldız ve diğerleri,2009:3).

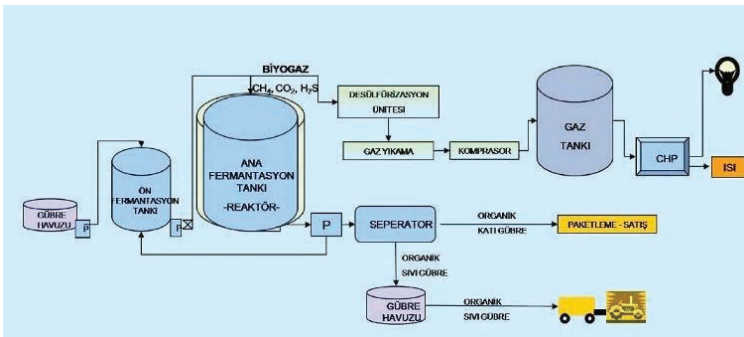
Biyogazdan enerji üretilen tesisler; organik atıkların yani biyokütlenin reaktörlerle biyogaza dönüştürülerek elektrik ve ısı elde edilen tesislerdir. Biyogaz reaktörleri; ısı eldesinde kütle kaybının veya kazancının olmadığı süreçler olarak tanımlanan adyabatik özelliğe sahip olmaları, kapalı sistem olmaları ve hava geçirmeyen yapıda olmaları nedeniyle biyogazın elde edilmesi için oldukça uygun ortamlardır. Biyogaz tesislerinde reaktörler; balon, kule ve çadır olmak üzere üç tipte bulunmaktadır(Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).



Resim 1. Reaktör Tipleri(Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).

2.BİYOĞAZ ENERJİ ÜRETİM TESİSİ PROSESLERİ

Biyogazdan enerji üretimi sırasında kullanılan reaktörler ve diğer prosesler bu prosesleri bünyesinde bulunduran özel tesislerle sağlanmaktadır. Biyogazdan elektrik enerjisi üretilirken kullanılan proseslerşekill'degösterilmektedir(Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y)



Şekil 1. Biyogaz Enerji Üretim Tesisi İş Akım Şeması(Biyogaz enerji santrali, 2019)

Proses, tesiste kullanılacak olan organik atıkların, sızdırmaz özelliğe sahip ve üzeri kapalı kamyonlarla tesise sevkiyatı ile başlamaktadır. Sevkiyatı gerçekleştiren kamyonların tesise girdikten sonra kantarda tartılarak, getirilen organik atıkların türünün, kaynağının ve araç bilgilerinin kayıt altına alınmasını sağlamasıyla devam etmektedir. Daha sonra dezenfeksiyon ünitesine yönlendirilen kamyonlar burada duşlama yöntemi kullanılarak özel kimyasal katkılı suyla dezenfekte edilmektedir. Getirilen organik atığın atık kabul ünitesi yani gübre havuzuna boşaltılması ardından, kamyonlar tekrar dezenfeksiyon ünitesine yönlendirilmektedir. Dezenfeksiyonun giriş ve çıkışta yapılmasının nedeni; atıkların toplandığı bölgelerdeki bakteri veya hastalıkların tesise girişinin ve atık toplamaya gideceği bölgelere herhangi bir bakteri ve hastalığın taşınmasının engellenmesidir(Biyogaz enerji santrali, 2019).

Tesise getirilen organik atıklardan biyogaz ve enerji üretiminin gerçekleşebilmesi için özel olarak tasarlanan tesisteki prosesler;

1. Gübre havuzu
 2. Fermantasyon tankı
 - a. Ön fermantasyon tankı
 - b. Ana fermantasyon tankı (Reaktörler)
 3. Desülfirasyon ünitesi
 4. Gaz yıkama ünitesi
 5. Kompresör
 6. Gaz tankı
 7. Kojenerasyon (CHP)
 8. Seperatör (Ayırıcılar)
- şeklinde(Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).

2.1. Gübre Havuzu: Toplanan organik atıklar gübre havuzuna belirli zaman aralıklarıyla eklenerek bir süre burada bekletilir. Gübre havuzunda atıkların bekletilmesinin amacı bakteri oluşumunu sağlamaktır. İstenilen düzeyde bakteri oluşumu sağlandıktan sonra gübre havuzundaki biyokütle fermantasyon tankına pompalanır(Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).



Resim2. Gübre Havuzu(Şarkışla Biyogaz Tesisi,2021)

2.2. Fermantasyon Tankı: Fermantasyon tankları beton tanklardır ve su deposu şeklinde tasarlanmışlardır. Gübre tankından pompalanan atıkların anaerobik bakterilerle biyolojik parçalanmaya uğrayarak biyogazın üretildiği tanklardır. Tankların üzerinde bulunan iki katlı membran örtü; üretilen biyogazın tankın tepesinde birikmesiyle şişerek biyogaz deposu olarak kullanılmaktadır(Biyogaz enerji santrali, 2019).

a. Ön Fermantasyon Tankı: Adyabatik hava geçirmeyen ön fermantasyon tankına iletilen biyokütle burada karıştırılarak sıkıştırılıp ön fermantasyona uğrayarak reaktöre iletilir (Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).

b. Ana Fermantasyon Tankı (Reaktör):Ön fermantasyondan geçerek reaktöre alınan biyokütle ortalama 37,5-38 °C'de bakterilerin ürettiği enzimler sayesinde sulu parçalanmaya uğratılır. Sulu parçalanma sonucunda oluşan asitler, biyokütle içindeki maddeleri parçalayarak metan üreten bakterilere dönüşüp biyogaz oluşumunu gerçekleştirir. Reaktörlerde üretilen biyogazın içeriğinde metan gazı oranının, enerji üretimi için yaklaşık %96-98 seviyesinde olması istenir. Bu amaçla ilk olarak reaktör içinde bulunan karıştırıcılar sayesinde biyogaz üretimi hızlandırılarak içeriğindeki metan yüzdesi %51 civarına çıkartılır. Karıştırıcıdan çıkan biyogazın içeriğinde ayrıca %48 civarında CO₂, %1 civarında ise diğer gazlar yani H₂S, H₂O, N₂, H₂ oluşumu gerçekleşir. İkinci olarak reaktör içinde oluşan biyogaz, reaktörün çatısında biriktirilip çeşitli proseslerden geçirilerek metan yüzdesinin artışı sağlanır. Reaktör çıkışında toplanan

biyogazın nem tutucularla nemi alınarak hidrojen sülfürün ayrıştırılması için desülfirizasyon ünitesine aktarılır(Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).



Resim 3. *Fermantasyon Tankı (Reaktör)(Şarkışla Biyogaz Tesisi,2021)*

2.3.Desülfirizasyon: Reaktörden gelen biyogazın içeriğindeki hidrojen sülfür; çevresel açıdan zararlı ve proseslerdeki gaz motorlarında korozyona sebep olması açısından giderilmesi gereken bir bileşendir. Bu amaçla biyolojik desülfirizasyon yöntemi kullanılır. Biyolojik desülfirizasyon ünitelerinde kullanılan sülfüre dayanıklı bakteriler, belirli oranda oksijen kullanarak hidrojen sülfürü elementer sülfüre ve sülfirik aside dönüştürerek biyogazdaki hidrojen sülfürün ortamdaki ayrılmasını sağlamaktadır. Hidrojen sülfürden bu yöntemle ayrıştırılan biyogaz gaz yıkama ünitesine iletilir (Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).

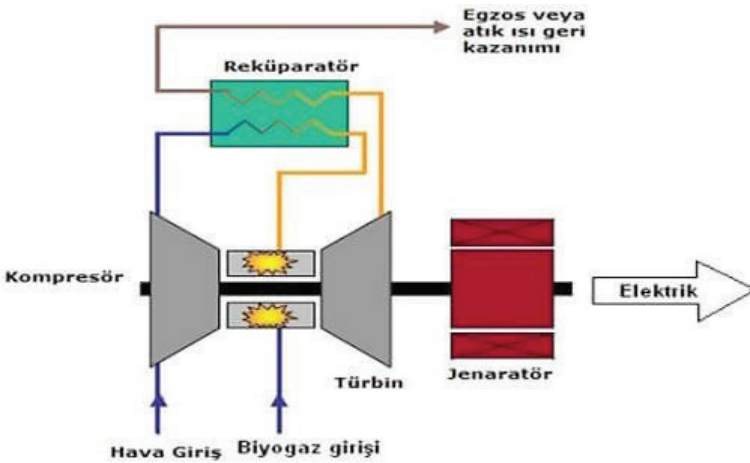
Biyolojik desülfirizasyon yöntemi performansının yüksek olmasına rağmen yüksek işletme maliyetini de beraberinde getirmektedir(Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).



Resim 4. *Desülfirizasyon Ünitesi(Şarkışla Biyogaz Tesisi,2021)*

2.4. Gaz Yıkama Ünitesi: Scrubber de denilen gaz yıkama ünitesi, biyogaz üretimini sağlayan tesisler ve bu tesisleri işleten işletmelerin faaliyetleri sonucu ortaya çıkan zararlı gazların ayrıştırılmasını sağlamaktadır. Gaz yıkama ünitesine iletilen biyogaz burada yerçekimi kuvveti veya yağmurlama yöntemi kullanılarak aşağı doğru hareketi sağlanan suyla karıştırılır. Basıncın da yükselip alçalmasıyla biyogaz içerisindeki CO_2 'nin emilmesi sağlandıktan sonra açığa çıkan diğer zararlı gazlar giderilene ve metan oranı yaklaşık %98 oluncaya kadar sistem kendini tekrarlar. Gaz yıkama ünitesinde metan oranı istenilen seviyeye ulaşan biyogaz, kompresörlere iletilir (Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).

2.5. Kompresörler: Gaz yıkama tankından gelen biyogazın enerji üretimi için gaz tankına iletilmesini sağlayan procestir(Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).



Şekil 2. Kompresör çalışma ilkesi(Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).

2.6. Gaz Tankı:Kompresörler aracılığıyla gaz tankına iletilen biyogaz, kojenerasyona iletilmek amacıyla burada bekletilir (Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).

2.7. Kojenerasyon(CHP):Biyogaz tesislerinde enerji üretiminin ısı ve elektrik enerjisi olarak aynı anda üretilmesini sağlayan ünitelerdir. Kojenerasyon ünitesinde istenilen oranda metan gazı içeren biyogazdan, içten yanmalı motorlarda yakılarak ısı enerjisi üretilirken gaz türbinlerine iletilen biyogaz ile elektrik enerjisi üretilerek elektrik şebekelerine aktarılmaktadır. Kojenerasyon ünitesinin çalışmasıyla üretilen ısı enerjisi ve elektrik üretimi sırasında açığa çıkan atık ısı termal enerji kaynağı olarak

gerek tesis içinde fermantörlerin sıcaklığının sabit tutulması gerekse tesis yakınlarında bulunan konut, işletme vb. yerlerin ısıtılması amacıyla kullanılabilir (Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).



Resim 5. Kojenerasyon Ünitesi(Blower)(Şarkışla Biyogaz Tesisi,2021)

2.8. Seperatör(Ayırıcı):Ön fermantasyon ve ana fermantasyon tankları olarak adlandırılan reaktörlerin dibinde fermantasyon sonucu atıklar birikmektedir. Biriken bu atıklar tarımsal arazilerin su tutma kapasitesini ve ürün kalitesini artırabilme gibibazı toprak şartlandırıcı özelliklere sahiptir. Bu sayede zenginleştirildiğinde biyogübre olarak kullanımı sağlanabilmektedir. Reaktörlerin dibinden alınan bu atıklar seperatörler aracılığıyla ayrıştırılarak katı ve sıvı gübre olmak üzere tarımsal arazilere iletilmektedir. Biyogaz ve biyogazdan enerji üretimini sağlayan proseslerde açığa çıkan atığın bile kullanılıyor olmasıyla sistem döngüsü tamamlanmaktadır (Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi, t.y.).

3.BİYOGAZDAN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETEEN TESİSLERİN İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Atık Yönetimi Yönetmeliği'nde atıkların geri kazanımı ve bertaraf gibi önemli tedbirler alınarak enerji üretimi amacıyla kullanılması ilkesinden hareketle kurulan biyogazdan enerji üreten tesisler; 25 Kasım 2009 tarih ve 27417 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan İş Sağlığı ve Güvenliği'ne İlişkin Tehlike Sınıfları Listesi Tebliği'ne göre; çöp ve kanalizasyon hizmetleri, tehlikeli atık tesisleri, katı atık depolama tesisleri ile katı atıkların geri kazanımı işlemleri olarak "Çok Tehlikeli" sınıf kapsamında değerlendirilmektedir.

Çok tehlikeli sınıfta yer alan atık bertaraf tesislerinde iş kazalarına ve meslek hastalıklarına yol açabilecek tehlikeler, bu tehlikelerin neden olacağı riskler ve alınması gereken önlemler bu bölümde açıklanmıştır.

3.1. Yangın, Parlama ve Patlama Riskinin Görüldüğü Prosesler ve Alınacak Önlemler

Atığın taşıma araçlarıyla tesise girişinde; araçlarda egzoz gazı tutucusu olmaması, araçların biyolojik ve kimyasal atık taşıyor olmalarından kaynaklı yangın ve patlama olmasına karşı; araçların güvenlikte kontrol edilmesi, araç sürücülerine tesis planı ve işin niteliği ile ilgili risklerin anlatılması ve araçlarda yangın söndürücü bulundurulması sağlanmalıdır. Tesiste bulunan trafo veya çevresel faktörler (sabotaj, enerji hatlarının yakınlığı vb.) nedeniyle çıkabilecek yangın tehlikesine karşı; alt yapı ile ilgili düzenlemelerin yapılması, trafo koruma rölelerinin ayarlarının yetkin firmalar tarafından uygun bir şekilde yapılması ve rutin olarak kontrol edilmesi, ex-proof malzemelerin kullanılması, aşırı ısınmaya karşı trafodaki ekipman ve tesisatın termal kameralarla izlenmesi ve/veya gerekirse değiştirilmesi sağlanmalıdır. Tesiste bulunan yangın söndürme sistemlerinin çalışmaması ve iş makinelerinden kaynaklı mekanik arızalar nedeniyle çıkabilecek yangın tehlikesine karşı; mekanik bakım bölümü bulundurulması, araçlarda yangın söndürücü bulundurulması ve yangın söndürme sistemlerinin teknisyenler tarafından periyodik olarak kontrol edilmesi sağlanmalıdır. Elektrik kablolarının zamanla ve kullanım şartlarına bağlı olarak yıpranma ve zarar görmeleri nedeniyle çıkabilecek yangın tehlikesine karşı; yetkili personelce rutin kontrollerin yapılması sağlanmalı, sahada çalışanlar yüksek gerilim hatları ile yeraltı ve yerüstü enerji hatları konusunda bilgilendirilmelidir. Kablodaki yüklenme; ortam sıcaklığı ve kablo güzergâhına bağlı olacak şekilde uygun malzemelerin seçilmesi ile azaltılmalı ve bölgesel özelliklere bağlı olarak uygun izolasyonun yapılması sağlanmalıdır(Ercan, 2016).

Mazot-propan ve fuel-oil tanklarının yüklenmesi, temizlenmesi, kaynak ve kesme çalışmalarından kaynaklı çıkabilecek yangın tehlikesine karşı tank alanının idari binadan uzak olacak şekilde konumlandırılması sağlanmalıdır (Ercan,2016). Tank alanının çevresine ve tankların üzerine uyarıcı nitelikteki “Dikkat Yanıcı Malzeme”, “Açık Alev ve Ateşle Yaklaşmak Yasaktır” , “Sigara İçilmez” levhalarının asılması ve kimyasallara ait Malzeme Güvenlik Bilgi Formlarının (Material Safety Data Sheet, MSDS) duvara asılması ve yangın söndürme ekibi ve sistemlerinin hazır duruma getirilmesi sağlanmalıdır (Yalçın, 2019).Bunker içinde aşırı ısınma, atıkların tutuşturucu bir kaynakla reaksiyona girmesi, havalandırmanın yetersiz olması, elektrik sisteminden kaynaklanan kıvılcım ve bunker içi dişlilerin sürtünmesiyle katı atıkların yanması ve patlamasına karşı bunker alanında havuzların yapılması, termal konfor şartlarının da göz önüne alınarak elektrik kablolarının kapalı sistem yapılması, bunkerin periyodik kontrollerinin yapılması sağlanmalıdır. Yangın ihtimaline karşı; yangın sensörü ve yangın söndürme sistemlerinin kurulması sağlanmalı-

dır. Tankların yapıldıkları malzeme nedeniyle atıkla reaksiyona girerek ve basınçlı sistemle çalışması nedeniyle yangın, parlama ve patlama olmasına karşı; basınç ve sıcaklıklarının düzenli kontrol edilmesi, tank kapaklarının yetkin kişiler tarafından açılıp kapatılması, tank çevresinin sürekli ve düzenli olarak temizlenmesi sızıntı varsa gerekli tedbirlerin alınması sağlanmalıdır. Patlamadan korunma dokümanının hazırlanması, yangın dedektörü ve yangın söndürme sistemlerinin bulundurulması sağlanmalıdır. Düzenli depolama alanında atıkların hava veya birbiri ile reaksiyona girerek yangın, parlama veya patlama oluşturmaya karşı; atıkların gömüldükten sonra örtü toprağı ile örtülmesi, reaksiyona girebilecek atıkların ayrı depolanması ve yangın söndürme sistemlerinin kurulması sağlanmalıdır. Yakma ünitesinde kontrolsüz atık besleme, döner fırının aşırı ısınması, reaktif ve korozif ortam oluşması ve basıncın kontrolsüz bir şekilde artması patlama ve yanmaya neden olacaktır. Patlama ve yanmaya karşı atıkların boyutunun küçültülmesi, belli miktarlarla konveyör bantlarla atık beslemenin yapılması, soğutucu kumanda odası kurulması, döner fırının içinin termal kameralarla izlenmesi sağlanmalıdır. Bu bölümdeki çalışanlar için uygun KKD ve ekipman temini ile ergonomik risklere karşı eğitimlerin düzenli verilmesi sağlanmalıdır(Ercan, 2016; Yalçın, 2019). Yakma ünitesinde ilk ateşlemenin yapılması sırasında brülör ve propan kullanımından kaynaklı yangın ve patlama olmasına karşı döner fırının yüksek basınç ve sıcaklığa dayanıklı bir malzemeden yapılması ve yine yangın söndürme sistemleri ve soğutucu sistemlerinin bulundurulması sağlanmalıdır (Ercan, 2016).Kompresör gibi basınçlı ekipmaların yangın ve patlamaya neden olmasına karşı; bu ekipmanların bakım ve onarımlarının periyodik olarak yaptırılması, elektrik kaçaklarına karşı kaçak akım rölelerinin kullanılması, yangın dedektörlerinin ve yangın söndürme sistemlerinin bulundurulması sağlanmalıdır(Ercan, 2016; Yalçın, 2019).

3.2. Ağır Metal Kaynaklı Risklerin Görüldüğü Prosesler ve Alınacak Önlemler

Düzenli depolama alanındaki koku, kimyasal gaz ve egzoz gazı nedeniyle kronik toksikasyona karşı atıkların örtü toprağı ile örtülmesi, çalışanların uygun kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanması ve periyodik sağlık kontrollerinin yapılması sağlanmalıdır. Bunkerin kapalı alanda olması nedeniyle kimyasal ve biyolojik maruziyete karşı operatöre gerekli KKD'lerin verilmesi, tavan vincinin bakım ve onarımının periyodik yapılması ve eğitimsiz kişilerle çalışmanın engellenmesi sağlanmalıdır. (Ercan, 2016).Yakma ünitesinde atık beslemenin fiçı veya Intermediate Bulk Container (IBC) ile yapılması halinde sızıntı olması, gaz çıkması nedeniyle kimyasal maruziyete karşı otomatik durdurma butonlarının bulundurulması ve çalışanların uygun KKD'leri kullanmaları sağlanmalıdır (Yalçın, 2019). Bu tür durumlarda tutuşturucu bir kaynakla etkileşim olmaması için tam ka-

palı devrelerin kullanılması, uyarıcı levhaların bulundurulması, saha gözetiminin sürekli yapılması düzenleyici ve önleyici faaliyet (DÖF) raporunun hazırlanarak çalışanlara düzenli ve yeterli eğitimin verilmesi sağlanmalıdır. Ayrıca bu alanda yangın söndürücü sistemleri ve yangın ekibi bulundurulmalıdır. İş makineleri ve forkliftlerle kimyasal içerikli atıkların taşınması sırasında dökülme, taşma ve gaz çıkışı nedeniyle operatörün kimyasal maruziyetine karşı ortam ölçümlerinin yapılması ve rutin olarak operatörün kan değerlerine bakılması sağlanmalıdır. Biyogaz ünitesinde bitkisel ve hayvansal kaynaklı atıkların neden olduğu biyolojik maruziyete karşı havalandırmanın uygun şekilde yapılması, çalışanların uygun KKD'leri kullanması ve çalışanlara duş imkânı sağlanmalıdır(Ercan, 2016).

3.3. Elektrik Tesisatı Kaynaklı Risklerin Görüldüğü Prosesler ve Alınacak Önlemler

Tank etrafında ıslak zemin kaynaklı elektrik kaçağı nedeniyle elektrik çarpmalarına karşı elektrik kaçaklarının kontrol edilmesi, kaçak akım rölelerinin kullanılması ve çalışanların uygun KKD kullanımını sağlanmasıdır. Elektrikli aletlerin kullanımı ve atıklardan elektrik enerjisi üretimi sırasında çalışanları elektrik çarpmasına karşı korumak için düzenli bakım-onarım yapılması, kaçak akım rölelerinin kullanılması, yalıtkan malzeme ve uygun KKD kullanılması, topraklamanın yıllık periyodik kontrollerinin yapılması, panoların önüne kauçuk paspaslar konulması ve elektrik üretiminden şebekeye geçişte önlemlerin alınması sağlanmalıdır(Ercan, 2016; Yalçın, 2019).

3.4. Kullanılan İş Makinelerinden Kaynaklı Risklerin Görüldüğü Prosesler ve Alınacak Önlemler

Araçlardan, iş makineleri ve ekipmanlar gürültü maruziyetine neden olacaktır. Gürültü maruziyetinin engellenmesi için yollar engebesiz hale getirilip hız limitleri konulmalı, ekipman bazlı gürültü haritası çıkarılarak çalışanların uygun KKD kullanması sağlanmalıdır. Forklift operatörünün gürültü maruziyetine karşı forkliftten kaynaklanan gürültünün düzenli olarak ölçülerek operatöre kulak koruyucu verilmesi, yolların eğimli ve pürüzlü olmasından kaynaklanan titreşim maruziyeti için el-kol titreşim maruziyet ölçümlerinin düzenli yapılması sağlanmalıdır(Ercan, 2016).Tesisite forkliftlerin ehliyetsiz kişiler tarafından kullanılması, bakımlarının yapılmamış olması, yaya ve forklift yolunun birbirinden ayrılmamış ve işaretlenmemiş olması, yeterli aydınlatmanın bulunmaması aşırı yüklenme ve üzerine çıkılarak çalışma yapılması nedeniyle düşme, çarpışma gibi kazaların olmasına karşı bakım ve onarım faaliyetlerinin düzenli yapılması, yaya yollarının ayrılması ve işaretleme ve aydınlatmanın yapılması, yüksekte çalışma için merdiven sistemlerinin kullanımı ve aşırı yüklemenin yasaklanması sağlanmalıdır (Yalçın, 2019).

3.5.Mekanik Araçlardan Kaynaklı Risklerin Görüldüğü Prosesler ve Alınacak Önlemler

Sıkıştırma ve pres makinelerinde uyarı levhalarının, kullanma, çalışma ve bakım talimatlarının olmaması nedeniyle karşılaşılabilecek fiziksel maruziyetine karşı sıkıştırma ve pres makinelerinde uyarı levhalarının, kullanma, çalışma ve bakım talimatlarının asılması sağlanmalıdır. Konveyör bantta emniyet durdurma telinin olmaması nedeniyle çalışanların fiziksel maruziyetine karşı bantın üzerine “Dikkat Çalışan Aksam” uyarı levhasının asılması ve bantın her iki tarafında da emniyet durdurma teli bulundurulması sağlanmalıdır. Blowerın kayış kasnak muhafazasının açıkta olması nedeniyle karşılaşılabilecek fiziksel maruziyete karşı; muhafazanın yerine takılması sağlanmalıdır. Bunker tavan vinci operatörünün sürekli oturarak ve tekrarlanan hareketlerle çalışmasından kaynaklı kas ve iskelet rahatsızlıkları ile karanlıkta çalışılması sebebiyle göz problemlerinden kaynaklı kazalara karşı operatör için molaların düzenlenmesi ve bu süreleri kullanması sağlanmalıdır. Bunkere atık boşaltımı sırasında aracın düşmesi, atığın dışarı dökülmesine karşı biriktirme ünitelerinin ayrı ayrı yapılması, yükseltilmiş bariyer bulundurulması, boşaltım sırasında kumanda odasından kapıların otomatik açılması sağlanmalıdır(Ercan, 2016).

3.6. Tozuma Kaynaklı Risklerin Görüldüğü Prosesler ve Alınacak Önlemler

Tesiste yolların toprak olması ve bu yolların düzenli olarak sulanmaması; iş makinelerinin kabinlerinde termal konfor şartlarının sağlanmaması ve hız limiti olmaması toza maruziyet sorununa neden olacaktır. Yolların düzenli olarak sulanması ve yol kenarında çalışan personel için uygun çalışma alanı sağlanmalıdır(Ercan, 2016).

3.7.Proseslerden Kaynaklı Diğer Riskler ve Alınacak Önlemler

Tesisin kurulu olduğu zeminin fay hattına yakın olması; kırıklı ve boşluklu yapısından dolayı yağmur yağdığına kaygan ve pürüzlü hale gelmesine neden olacaktır. Kış aylarında ise bu durum buzlanma sorununa neden olacaktır. Çalışan personel bu tür durumlarda nasıl davranması gerektiği konusunda bilgilendirilmelidir(Ercan, 2016).

Yollarda yeterli aydınlatma, trafik işaretleri ve park alanlarının olmaması araç kazalarına neden olacaktır. Tesise giren tüm araç sürücülerine (ziyaretçiler dâhil) tesis planı gösterilmeli, park alanları net bir şekilde belirtilmeli ve uygunsuz parkı engelleyici önlemler alınmalıdır (Yalçın, 2019).

Atıkların üstü açık kamyonlarla gelmesi; atıkların taşıma sırasında dökülmesi ve araçlardan kaynaklı egzoz gazları salınımı koku maruziyetine neden olacaktır. Açık şekilde gelen atıkların tesise kabul edilmemesi

veya açık paketlerin kapalı hale getirilmesi sağlanmalıdır. Tesise gereksiz araç girişleri önlenmelidir. Atık alınan firmalara atık gönderimi ve atığın kaynakta ayrımı konularında eğitim verilmesi çalışanların ise maske kullanması sağlanmalıdır(Ercan, 2016).

Tesise girişte atık getiren araçların atıkla teması sonucu sahadaki kirliliğin tesis dışına taşınmasına karşı; tekerlek yıkama üniteleri bulundurulması sağlanmalıdır(Yalçın, 2019).

Atığın tesise girişi ardından kantar bölümüne alınan atıkların tartımı sırasında aracın kantara hızlı girmesi, fazla yüklenmiş olması, kantar zemininin pürüzlü ve kaygan olmasından dolayı aracın devrilmesine karşı; araçların kantara tek tek alınması, kantarın kenarlarına demir parmaklıklar yapılması, kantar zemininin düzgün ve pürüzsüz olması, mevsimsel olarak sürekli kontrol edilmesi, aracın kantara çıkarken doluluk açısından gözle kontrol edilmesi ve araçların hız limitlerine uyması sağlanmalıdır (Ercan, 2016).

Tesis girişinde yükleme rampasında korkuluğun olmaması veya kısa olması, rampada boşluk, engebe ve göçmelerin olması nedeniyle aracın devrilmesine karşı; rampanın gereken şartlara uygun olması sağlanmalıdır(Ercan, 2016; Yalçın, 2019).








Atıkların taşınması sırasında uygun şekilde paketlenmemesi; atıkların taşıma sırasında sıçraması sonucu yaralanmalara neden olacaktır. Sürekli kontrol edilerek çalışanlara baret ve iş ayakkabısı kullanılması, kamyon vb. taşıma makinelerinin üstlerinin kapatılması, özellikle sıvı atıkların dökülmesinin önlenmesi için IBC ve fiçi ile taşınması sağlanmalıdır. Tesise kabul edilen atıklara tehlikeli atık karışması ihtimaline karşı tehlikeli atıkların ayrıştırılması ve depolanması için çalışanların atıkları tanımalarını ve kaynakta ayırmasını sağlayan eğitimlerin verilmesi sağlanmalıdır. Tesis genelinde koku, kirletici gazlar nedeniyle oluşan haşere, yabani hayvan ve tehlikeli kimyasalların olduğu bir ortamda çalışıyor olmanın neden olduğu yorgunluk, tükenmişlik sendromu gibi psikolojik sorunlara karşı çalışanların sağlık muayenelerinin düzenli yapılması, koku problemi için gerekli önlemlerin alınması, yabani hayvanlar için aşılanmanın yapılması, haşere için düzenli ilaçlama yapılması, ve motivasyon için sosyal etkinliklerin yapılması sağlanmalıdır(Ercan, 2016).

Çok tehlikeli sınıfta yer alan biyogazdan elektrik üretimi yapan tesislerin iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesine örnek olarak Kapadokya OSGB (Ortak Sağlık ve Güvenlik Birliği) tarafından hazırlanan SEÇ (Sağlık Emniyet Çevre) Uygunsuzluk ve DÖF raporu Tablo1'de sunulmuştur (Yalçın, 2019).







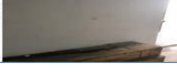





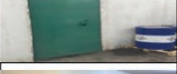

Veri		HER ENERJİ		Uygunluğun Risk Grubu		Tolerans gösterilemez risk: Önlem alınmadan çalışmaya Orta Önemli risk: Esas olarak yönetilebilir (Tutarlıdır) Düşük Olası risk: Gözlem altında başlatılabilir (İkayem gerektirir)	
Proje Başlangıç Tarihi -		Kasım 2019		Uygunluğun Risk Grubu		Tolerans gösterilemez risk: Önlem alınmadan çalışmaya Orta Önemli risk: Esas olarak yönetilebilir (Tutarlıdır) Düşük Olası risk: Gözlem altında başlatılabilir (İkayem gerektirir)	
Rapor Tarihi-Observation		Kasım 2019		Uygunluğun Risk Grubu		Tolerans gösterilemez risk: Önlem alınmadan çalışmaya Orta Önemli risk: Esas olarak yönetilebilir (Tutarlıdır) Düşük Olası risk: Gözlem altında başlatılabilir (İkayem gerektirir)	
Rapor No - Rapor No		1		Uygunluğun Risk Grubu		Tolerans gösterilemez risk: Önlem alınmadan çalışmaya Orta Önemli risk: Esas olarak yönetilebilir (Tutarlıdır) Düşük Olası risk: Gözlem altında başlatılabilir (İkayem gerektirir)	
NCR No Observation no	Faaliyet Activity	Uygunluğun Tanımı Observation Description	Uygunluğun Fotoğrafı Picture	Risk Analizi Sorgusu Risk Assessment Query	Risk Grubu Risk Group	Kişi/Firma Responsible Person Or Company	Uygunluk Durumu State
1	Yıkama	Yıkama kanalı girişinde "Yavaş Girin, Yavaş Çıkın" şeklinde uyarı levhası olmaması ve kanar betonların sarı sıyah çapraz renkte boyanması.		Yıkama kanalı girişinde "Yavaş Girin ve Yavaş Çıkın" şeklinde uyarı levhası bulunmalı ve kanar betonlar sarı sıyah çapraz renkte boyanmalıdır.	Orta	Her Enerji	Açık
2	Araç	Araçların stop lambalarının olmaması ve çalışmaması.		Araçların stop lambaları tamamlanmalı ve çalışır halde olmalı.	Yüksek	Her Enerji	Açık
3	Araç	Araçların stop lambalarının çalışmaması, plakalarının olmaması.		Araçların stop lambaları çalışır halde olmalı ve plakaları takılı olmalıdır.	Yüksek	Her Enerji	Açık
4	Yemektehane	Yemektehanenin hijyen kurallarına uygun olmaması kirliliği olması.		Yemektehanenin her yemektan sonra düzenli bir şekilde temizlenmeli.	Orta	Her Enerji	Açık







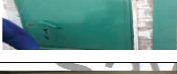



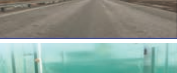




Tablo 1. Kayseri Biyogaz Tesisi Kapadokya OSGB SEÇ Uygunluk ve DÖF Raporu (Yalçın, 2019)

5	Yemektehane	Yemektehanede kullanılan mutfak bulaşıcı yıkamada kupa gaz dedektörü ve alarm cihazının olmaması.		Yemektehanede kullanılan mutfak bulaşıcı yıkamada kupa gaz dedektörü ve alarm cihazı takılmamıştır.	Yüksek	Her Enerji	Açık
6	Taşeron Depo	Mazot ve ADD Blue tanklarının üstlerinde "Dikkat! Yanıcı Maltreze", "Açık Alev ve Ateşle Yaklaşmak Yasaktır", "Sigara İçilmez" levhasının olmaması.		Mazot ve ADD Blue tanklarının üstlerinde "Dikkat! Yanıcı Maltreze", "Açık Alev ve Ateşle Yaklaşmak Yasaktır", "Sigara İçilmez" levhasının takılması.	Yüksek	Her Enerji	Açık
7	Taşeron Depo	Soyunma odasındaki dolapların yeterli ve düzenli olmaması, oda içinde dolap dışında kuyulu olmaması, oda içinde yerlerde personelin üstünü değiştirmesi için kullanılması.		Soyunma odasındaki dolaplar yeterli sayıda olmalı ve düzenlenmeli, oda içinde dolap dışında kuyulu olmamalı, oda içinde yerlerde personelin üstünü değiştirmesi için kullanılmalıdır.	Orta	Her Enerji	Açık
8	Taşeron Depo	Yağ kanallarının kenarlarında korkuluk olmaması, kanar kenarların sarı sıyah çapraz renkte boyanması.		Yağ kanallarının kenarlarında korkuluk olmalı ve kanar kenarların sarı sıyah çapraz renkte boyanmalı.	Yüksek	Her Enerji	Açık
9	Taşeron Depo	Deponun dâimî ve düzenli olması.		Depo düzenlenmeli.	Orta	Her Enerji	Açık
10	Taşeron Depo	Oksijen Asitlen tüpünün düzgün bir araç içinde olmaması bağsız olması, üstünde "Dikkat! Yağlı-Kirli El ile Tutmayınız" ve "Açık Alevle, Ateşle Yaklaşmak Yasaktır", "Sigara İçilmez" levhasının olmaması.		Oksijen Asitlen tüpünün düzgün bir araç içinde olmalı, taşıma arabasına bağlanmalı, üstünde "Dikkat! Yağlı-Kirli El ile Tutmayınız" ve "Açık Alevle, Ateşle Yaklaşmak Yasaktır", "Sigara İçilmez" levhasının takılması.	Yüksek	Her Enerji	Açık
11	Taşeron Depo	Oksijen Asitlen tüpünün palama girişi ve saat çıkışında alev geri tepme emniyet ventili olmaması.		Oksijen Asitlen tüpünün palama girişi ve saat çıkışında alev geri tepme emniyet ventili olmalı.	Yüksek	Her Enerji	Açık

12	Taeyeron Depo	Mazot tanklarının bulunduğu IBC tankların yakınılarında 50 KG yangın tüpünün olması		Mazot tanklarının bulunduğu IBC tankların yakınılarında 50 KG yangın tüpünün olması. Her "Yük" ün yanına uygun levhası asılmaktadır.	Yüksek	Her Enerji	Açık
13	Taeyeron Depo	Duvarlarda "Dikkat Yanıcı Malzeme", "Açık Alev ve Ateşle Yakılmamak Yasaktır", "Sigara İçilmez", "KHK Kullan", "Dikkat Kaygan Zemin" şeklinde 25*35 cm büyüklükte uyarı levhasının		Duvarlarda "Dikkat Yanıcı Malzeme", "Açık Alev ve Ateşle Yakılmamak Yasaktır", "Sigara İçilmez", "KHK Kullan", "Dikkat Kaygan Zemin" şeklinde 25*35 cm büyüklükte uyarı	Orta	Her Enerji	Açık
14	Taeyeron Depo	Elektrik Kablolarının yanıcı malzeme taşıyan IBC tanklarının üzerlerinde galisiye olması		Elektrik Kablolarının yanıcı malzeme taşıyan IBC tanklarının üzerlerinde galisiye olması ve kablolar için duvarlara asılı	Yüksek	Her Enerji	Açık
15	Yenisekane	Yenisekane personelinin PORTOR muayeneletinin ve Hijyen Sertifikasının olmaması, kişisel hijyene dikkat etmemesi		Yenisekane personelinin PORTOR muayeneletinin tamamlanması, Hijyen Sertifikası olması kişisel hijyene dikkat etmelidir.	Orta	Her Enerji	Açık
16	Araç	İş makinelerinin üzerlerinde "Operatör Harici Bineklik Kullanmak Yasaktır", Çalışan Makineye Yaklaşmamak Yasaktır" şeklinde uyarı levhasının olması		İş makinelerinin üzerlerinde "Operatör Harici Bineklik Kullanmak Yasaktır", Çalışan Makineye Yaklaşmamak Yasaktır" şeklinde uyarı levhasının asılmaktadır.	Yüksek	Her Enerji	Açık
17	Araç	İş makinelerinin kapılarının açık bırakılması.		İş makinelerinin kapıları her zaman kapalı bırakılmaktadır.	Yüksek	Her Enerji	Açık
18	Araç	İş makinelerinin kontrol cam ve diğer aksesuarlarının yapılmaması olması		İş makinelerinin kontrol cam ve diğer aksesuarlarının onarılmaktadır.	Yüksek	Her Enerji	Açık

19	Giriş	Giriş kantarı kısmında "Giriş" "Müracaat" ve "Dur" gibi levhaların olması.		Giriş kantarı kısmında "Giriş" "Müracaat" ve "Dur" gibi levhası olmalıdır.	Orta	Her Enerji	Açık
20	Giriş	Otomatik Kapı "Dikkat Kapı Çarpma" yada "Dikkat Otomatik Kapı" şeklinde uyarı levhasının olmaması.		Otomatik Kapı üzerine "Dikkat Kapı Çarpma" yada "Dikkat Otomatik Kapı" şeklinde uyarı levhasının asılmaktadır.	Orta	Her Enerji	Açık
21	Yollar	Saha Kantarında "Dikkat Yavaş GİRİN-ÇIKIN", "Dikkat Kaygan Zemin" şeklinde uyarı levhasının olmaması ve beton kusurlarında bariyer ya da herhangi bir uyarıcı olmaması.		Saha Kantarında "Dikkat Yavaş GİRİN-ÇIKIN", "Dikkat Kaygan Zemin" şeklinde uyarı levhasının olması ve beton kusurlarında bariyer ya da herhangi bir	Yüksek	Her Enerji	Açık
22	Yollar	Saha genelinde "Dikkat Alan", "Belirliye Araçları", "Dikkat Yavaş", "Parlamalı Yükleme", "Dikkat Hayvan Çıkabilir", "Dikkat Çöp Toplayıcı Çıkabilir" şeklinde uyarıcı ve yönlendirici		Saha genelinde "Dikkat Alan", "Belirliye Araçları", "Dikkat Yavaş", "Parlamalı Yükleme", "Dikkat Hayvan Çıkabilir", "Dikkat Çöp Toplayıcı Çıkabilir" şeklinde	Yüksek	Her Enerji	Açık
23	Araç	Toplama da kullanılan Forkliftlerin Periyodik Kontrollerinin Makine Mühendislerine Yapılmaması Olması, üzerlerinde "Operatör Harici Bineklik Kullanmak		Toplama da kullanılan Forkliftlerin Periyodik Kontrollerinin Makine Mühendislerine yolda bir kez düzenli olarak yapılmalıdır, üzerlerinde "Operatör Harici	Yüksek	Her Enerji	Açık
24	Makine teçhizat	Sıkıştırma ve pres makinelerinde uyarı levhasının, kullanma, çalışma ve bakım talimatlarının olmaması.		Sıkıştırma ve pres makinelerinde uyarı levhasları asılması üzerlerinde kullanma, çalışma ve bakım talimatlarının olmalıdır.	Yüksek	Her Enerji	Açık
25	Makine teçhizat	Konveyör bantta emniyet durdurma tuşinin olmaması. Üzerinde Uyarı levhasının olmaması.		Konveyör bantın her iki tarafında da emniyet durdurma tuşinin olması ve bant kenarlarında "Dikkat Çalışan Aksam/Uyan Levhası asılmaktadır.	Yüksek	Her Enerji	Açık

26	Personel	Çalışan personellerin sağlık raporlarının, özlük dosyalarının, kişisel koruyucu donanımlarının olması ve kullanılması.		Toplama da çalışan personellerin sağlık raporları, özlük dosyaları, kişisel koruyucu donanımları olmalı.	Yüksek	Her Enerji	Apık
27	Santrol	Santrol kapı girişinde "Dikkat İşi olmayan Gireser", "Dikkat Yüksek Voltaj", "KKD Kullan", "Kapıyı Kapatı Tutur" şeklinde 25*35 cm ebatında uyarı levhalarının olması.		Santrol kapı girişinde "Dikkat İşi olmayan Gireser", "Dikkat Yüksek Voltaj", "KKD Kullan", "Kapıyı Kapatı Tutur" şeklinde 25*35 cm ebatında uyarı levhaları.	Orta	Her Enerji	Apık
28	Operatör Odası	Operatörlerin oturduğu odanın düzenli ve dejenli olması, dolapların yeterli olması.		Operatörlerin oturduğu oda daha düzenli olmalı, yeterli dolaplar yeterli hale getirilmelidir.	Orta	Her Enerji	Apık
29	Operatör Odası	Operatörlerin kaldığı odada kırınc priz olması.		Operatörlerin kaldığı odada kırınc priz onarılmalıdır.	Yüksek	Her Enerji	Apık
30	Operatör Odası	operatörlerin oturduğu odada bir prizde çok fazla elektrikli cihaz takılı olması ve sigaredi açık kalması, içerde sigara içilmesi olması.		operatörlerin oturduğu odada bir prizde çok fazla elektrikli cihaz takılı olması dolayısıyla bu prize kaçak akım rölesi takılmalıdır.	Orta	Her Enerji	Apık
31	Og 1	OGİ odası için uyarı levhalarının olması ve acil durum için plastik kanca olmaması.		OGİ odası için uyarı levhaları asılmalı ve acil durum için plastik kanca alınmalıdır.	Yüksek	Her Enerji	Apık
32	Og 1	OGİ odası içinde kullanılan anahtar ya da diğer ekipmanların durumda uygun bir şekilde asılı olmaması ve saplarının izole olmaması.		OGİ odası içinde kullanılan anahtar ya da diğer ekipmanların durumda uygun bir şekilde asılı olmalı saplarının izole olmalıdır.	Orta	Her Enerji	Apık
33	Og1	OGİ odası kapı giriş kısmında elektrik izoleli paspas olması.		OGİ odası kapı giriş kısmında elektrik izoleli paspas tamamlanmalıdır.	Yüksek	Her Enerji	Apık
34	Og 1	OGİ oda kapılarında boya dolayısıyla sökülen ve eskilen uyarı levhalarının yerlerine takılmaması ve yenilenmesi olması.		OGİ oda kapılarında boya dolayısıyla sökülen ve eskilen uyarı levhalarının yerlerine takılmalı ve yenilenmesi gerekler yenilenmelidir.	Yüksek	Her Enerji	Apık
35	Trafik	Trafik kapılarında boya dolayısıyla sökülen ve eskilen uyarı levhalarının yerlerine takılmaması ve yenilenmesi olması.		Trafik kapılarında boya dolayısıyla sökülen ve eskilen uyarı levhalarının yerlerine takılmalı ve yenilenmesi gerekler yenilenmelidir.	Yüksek	Her Enerji	Apık
36	Blower	Blowerın kayış kasnak muhafazasının açıkta olması.		Blowerın kayış kasnak muhafazası yerine takılmalıdır.	Yüksek	Her Enerji	Apık
37	Blower	Blower kapı girişinde boya dolayısıyla sökülen ve eskilen uyarı levhalarının yerlerine asılmaması veya yenilenmesi olması.		Blower kapı girişinde boya dolayısıyla sökülen ve eskilen uyarı levhalarının yerlerine asılmalı ve yenilenmesi gerekler yenilenmelidir.	Orta	Her Enerji	Apık
38	Depo	Depo kapı girişinde boya dolayısıyla sökülen ve eskilen uyarı levhalarının yerlerine asılmaması ve ya yenilenmesi olması.		Depo kapı girişinde boya dolayısıyla sökülen ve eskilen uyarı levhalarının yerlerine asılmalı ve yenilenmesi gerekler yenilenmelidir.	Orta	Her Enerji	Apık
39	Depo	Depo rafının düzensiz olması.		Depo rafın düzenlenmeli.	Orta	Her Enerji	Apık

40	Depo	Depoda kullanılan taşınır göç koruyucusunun, ön dayanımı, yan koruyucunun olmaması, yakınlarda "KKD Kullan", "Görülük Kullan" şeklinde uyarı levhalarının olmaması.		Depoda kullanılan taşınır göç koruyucusu, ön dayanım, yan koruyucu yerine takılmalı ve yakınlarda "KKD Kullan", "Görülük Kullan" şeklinde uyarı levhası asılmalıdır.	Yüksək	Her Enerji	Açık
41	Depo	Depo içinde kullanılan yağ ya da mazot varillerinin altlarında dökele ve taşınması karşı ikincil kap olmaması.		Depo içinde kullanılan yağ ya da mazot varillerinin altlarında dökele ve taşınması karşı ikincil kap konulmalıdır.	Orta	Her Enerji	Açık
42	Ag	AG odasında uyarı levhalarının olmaması		AG odasında uyarı levhaları asılmalıdır.	Yüksək	Her Enerji	Açık
43	Ag	AG odasının içinin dağınık olması		AG odası düzenlenmelidir.	Yüksək	Her Enerji	Açık
44	Ag	AG odasında elektrik izale paspası olmaması		AG odasında elektrik izale paspası taşınmalıdır.	Yüksək	Her Enerji	Açık
45	Ag	AG odasında gereksiz malzemelerin olması		AG odasında ki gereksiz malzemeler kaldırılmalıdır.	Yüksək	Her Enerji	Açık
46	Ag	Ag oda kapı girişinde boya dolayısıyla sökülün ve eskiyen uyarı levhaların yerlerine asılmaması ve ya yenilenmemiş olması.		Ag oda kapı girişinde boya dolayısıyla sökülün ve eskiyen uyarı levhaları yerlerine asılmalı ve yenilenmesi gerektiler yenilenmelidir.	Yüksək	Her Enerji	Açık
51	Kompresör	Kompresör odasının dağınık olması		Kompresör odası düzenlenmelidir.	Orta	Her Enerji	Açık
52	Kompresör	Kompresör odasında yağ ve diğer malzemelerin olması		Kompresör odasında kullanılmayan malzemeler kaldırılmalıdır.	Orta	Her Enerji	Açık
53	H2S Tankı	Sülfür tanki metal hurda kapaklarının alt kısmalarında değiştirilerek kullanılması amacıyla sabit seyir platformu olmaması, tanki üzerlerinde "Dükkar KKD Kullan" şeklinde uyarı levhalarının olmaması.		Sülfür tanki metal hurda kapaklarının alt kısmalarında değiştirilerek kullanılması amacıyla sabit seyir platformu yapılmalı ve tanki üzerlerinde "Dükkar KKD Kullan" şeklinde uyarı levhası asılmalıdır.	Yüksək	Her Enerji	Açık
54	Yollar	Çöp dökme yolunda "Azami 20 KMY", "Dükkar Kaygan Zemin" şeklinde uyarı levhalarının çoğaltılarak yol boyunca asılı olmaması.		Çöp dökme yolunda "Azami 20 KMY", "Dükkar Kaygan Zemin" şeklinde uyarı levhaları çoğaltılarak yol boyunca asılı olmalıdır.	Yüksək	Her Enerji	Açık
47	Gen Set	Generatör kapı girişinde boya dolayısıyla sökülün ve eskiyen uyarı levhalarının yerlerine asılmaması ve ya yenilenmemiş olması.		Generatör kapı girişinde boya dolayısıyla sökülün ve eskiyen uyarı levhaları yerlerine asılmalı ve yenilenmesi gerektiler yenilenmelidir.	Yüksək	Her Enerji	Açık
48	Trafo	Trafo kapı girişinde boya dolayısıyla sökülün ve eskiyen uyarı levhalarının yerlerine asılmaması ve ya yenilenmemiş olması.		Trafo kapı girişinde boya dolayısıyla sökülün ve eskiyen uyarı levhaları yerlerine asılmalı ve yenilenmesi gerektiler yenilenmelidir.	Yüksək	Her Enerji	Açık
49	Gen Set	Generatör üst katlarında korkuluk olmaması		Generatör üst katlarında korkuluk yapılmalı.	Orta	Her Enerji	Açık
50	Kompresör	Kompresörün Makine Mühendislerine periyodik kontrollerini yaptırılmaması olması ve kayış kontrol muhafazasının olmaması		Kompresör Makine Mühendislerine yılda bir düzenli olarak periyodik kontrolü yaptırılmalı ve kayış kontrol muhafazasının yerine getirilmelidir.	Yüksək	Her Enerji	Açık

4. SONUÇ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyogaz üretiminin kullanımı; çevresel anlamda başta küresel ısınmaya sebep olan sera gazlarını azaltması olmak üzere yüksek potansiyele sahip organik atıkların atık yönetimi esaslarında belirtildiği üzere enerji geri kazanımı yöntemiyle enerji üretimi sırasında ekonomik kazanç sağlaması açısından avantaj sağlamaktadır(Nacar Koçer,N., 2013:3). Biyogaz ve biyogazdan enerji üretimi yapılan tesislerin avantajlı yapıları; bu tesislerin sürdürülebilir kaynaklar arasında yer almasını ve iş güvenliği ve sağlığı açısından da değerlendirilmesini gerektiren tesislerden olmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmamızda Her Enerji'nin Kayseri Biyogaz tesisi için Kapadokya OSGB A sınıfı iş güvenliği uzmanı ve çalışmamızın üçüncü yazarı olan Yusuf YALÇIN tarafından hazırlanan SEÇ Uygunsuzluk ve DÖF raporu ile Şarkışla Biyogaz Tesisi'ne ziyaretimiz neticesinde Çevre Mühendisi Miraç ÖKSEM'den edindiğimiz bilgiler yer almaktadır.

KAYNAKLAR

- Akkurt, Ş. ve Oğuz, M. (2017). Kayseri ilinin yenilenebilir enerji potansiyeli. *Ömer Halis Demir Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 6,(2),362-374.
- Anaerobik çürütme.(t.y.) Erişim adresi: http://www.alternatifpower.com.tr/resimler/218_7644_1403534180.pdf. Erişim tarihi: 20.06.2021.
- Atık Yönetimi Yönetmeliği (2015, 02 Nisan). Resmi Gazete (Sayı: 29314). Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150402-2.htm>
- Biyogazenerjisentrali.(2019). ÇorumBiyogazEnerjiSantraliKapasiteArtışProjesi Son Şekli Verilen ÇED Raporu. Erişim adresi: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/corum/duyurular/corum-biyogaz--8230-22336-20190527144907.pdf>. Erişim tarihi: 22.06.2021.
- Biyogaz enerji üretim tesisi. (t.y.) Sarıkamış ve Arpaçay İlçelerinde Biyogaz Tesisinin Kurulmasına Yönelik Ön Araştırma Raporu, Erişim adresi: <https://www.serka.gov.tr/assets/upload/dosyalar/sarikamis-ve-arpacay-ilcelerinde-biyogaz-tesisinin-kurulmasina-yonelik-on-arastirmarapo-ru.pdf>. Erişim tarihi: 23.06.2021.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2017). Öztürk, M.”Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretimi”. Erişim adresi: http://www.cevresehirkutuphanesi.com/assets/files/slider_pdf/UWDntXjXQmfS.pdf.
- Ercan, M., (2016). Tehlikeli Atıkların Bertaraf Tesislerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Yönünden İncelenmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.
- İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği, Ek-1 (İşyeri Tehlike Sınıfları Listesi), T.C. Resmi Gazete Sayısı (28509, 26.12.2012).
- Karaosmanoğlu, F. (2011). Biyogaz Üretiminde Kullanılabilecek Atıklar. Erişim adresi: https://webdosya.csb.gov.tr/db/destek/icerikler/bolum_7-20191127123133.pdf. Erişim tarihi: 25.04.2021.
- Nacar Koçer, N. (2013). Malatya’da Hayvancılık Potansiyeli ve Biyogaz Üretimi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi – SAUJS*, 1, (17), 1-8.
- Şarkışla Biyogaz Tesisi, (2021), İstanbul: Sehra Enerji A.Ş.
- Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretimi Amaçlı Kullanımı Kanunu (2005, 10 Mayıs). Resmi Gazete (Sayı: 5346). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.5346.pdf>
- Biyogaz tesisleri ile ısı elektrik üretimi. (t.y.) Erişim adresi: <https://www.muhendisbeyinler.net/biyogaz-tesisleri-ile-isi-elektrik-uretimi/>. Erişim tarihi: 30.04.2021.

- Yalçın, Y., (2019). Kayseri Biyogaz Tesisi SEÇ Uygunluk ve DÖF Raporu, Kapadokya OSGB, Aksaray.
- Yıldız,Ş., Saltabaş,F., Balahorli, V., Sezer, K. ve Yağmur,K., (2009). Organik atıklardan biyogaz üretimi (Biyometanizasyon) projesi-İstanbul örneği İSTAÇ A.Ş, YTÜ TÜRKAY (Türkiye’de Katı Atık Yönetimi) Sempozyumu, İstanbul, 1-8.

Bölüm 4

POLIAKRILONİTRİL ESASLI KARBON LİF ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE ALTERNATİF STABİLİZASYON ÇALIŞMALARI

*Kemal Şahin TUNÇEL*¹*

Tuba DEMİREL²

İsmail KARACAN³

1 Öğr. Gör. Kemal Şahin TUNÇEL, Siirt Üniversitesi, Geleneksel El Sanatları Bölümü, Siirt, Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-5095-6543

2 Tuba DEMİREL, Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, ORCID ID: 0000-0002-5760-3705

3 Prof.Dr. İsmail KARACAN, Erciyes Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, ORCID ID: 0000-0002-9047-1011

*Sorumlu Yazar: Kemal Şahin TUNÇEL, e-mail: kemalsahintuncel@gmail.com

1. GİRİŞ

Karbon lif, yapısında ağırlıkça en az %92 karbon içeren lif olarak tanımlanmaktadır (Donnet ve Bansal, 1984; Park, 2015). İlk kez Thomas Edison, (1880) tarafından pamuk ve bambu gibi selüloz esaslı maddelerden elde edilerek akkor lambalarda kullanılan ve patenti alınan karbon lif, teknolojik gelişmelerle birlikte sürekli olarak yenilenmiş ve günümüz endüstrisinde birçok alanda ihtiyaç duyulan bir malzeme haline gelmiştir. Polietilen (Zhang, 1993; Younker ve ark., 2013; Barton ve ark., 2015; K-W. Kim ve ark., 2015; Li ve ark., 2016), Polipropilen (Kaneko ve Sato, 2005; Ko ve Taipei, 2010; Karacan ve Benli, 2011), Polivinilklorür (Qiao ve ark., 2004), Polistiren (Sumitomo kimya Ltd, 1973), Polibenzimidazol (Stuetz, 1969), Poli(p-fenilen tereftalamid) (K.S. Ko ve ark., 2001), Poliamid (Karacan ve Tunçel, 2013a; 2013b) gibi birçok polimerik malzeme karbon lif üretiminde hammadde olarak değerlendirilmiştir. Ancak, sadece poliakrilonitril (PAN), Rayon ve Zift esaslı hammaddeler ticari olarak üretilebilme imkânına sahip olabilmektedir.

Petrol veya kömür katranı ziftinden elde edilen mezofaz zifti, yüksek karbon içeriği ve yüksek karbon verimiyle bir karbon lif hammaddesi olarak değerlendirilmektedir. Mezofaz zift esaslı karbon lifler PAN ve Rayon esaslı karbon liflerle karşılaştırıldığında grafit benzeri bir yapıya sahiptirler ve bu grafit yapısı yüksek gerilme modülü ve termal iletkenlik elde etmeye yardımcı olsa da, liflerin kırılma olmasına ve dolayısıyla işlenmesinin zorlaşmasına yol açmaktadır. Rayon esaslı karbon lifler ise, geniş yüzey alanları sayesinde özellikle filtrasyon amaçlı kullanılmalarına rağmen düşük gerilme mukavemeti ve düşük karbon verimi gibi olumsuz özellikleri nedeniyle üretimleri sınırlı olmaktadır. Bu nedenlerle, yüksek performanslı karbon lif üretiminde; PAN esaslı karbon lifler, yüksek gerilme mukavemeti ve yüksek karbon verimi gibi özellikleri nedeniyle diğer maddelerle kıyaslandığında daha fazla ön plana çıkmakta ve bu üstün özellikler neticesinde dünya pazarının %90'undan fazlasına (Moskowitz ve ark., 2020) sahip olmaktadır.

Karbon lifler, genel kullanım amaçlı veya yüksek performans kullanım amaçlı olarak temin edilebilirliklerine göre sınıflandırılabilir. Genel kullanım amaçlı karbon lifler, düşük gerilme mukavemetine ve düşük gerilme modülüne sahiptir. Fakat bu karbon liflerin en büyük avantajı maliyetlerinin de düşük olmasıdır. Yüksek performans kullanım amaçlı karbon lifler ise, yüksek mukavemet ve yüksek modül değerlerine sahiptir (Park, 2015). Aynı zamanda, bu karbon lifler mukavemet/ağırlık oranı açısından geleneksel malzemelere kıyasla çok büyük avantajlara sahiptir.

Tüm bu özellikler doğrultusunda karbon lifler, enerji, uzay ve havacılık, savunma sanayi, denizcilik, inşaat, biyomedikal ve spor (Fitzer,

1989; Donnet ve Bansal, 1990; Savage, 1993; Catta Preta ve ark., 2007) gibi bir çok uygulama alanında kullanılabilir olmasına rağmen özellikle son dönemde azaltılmış araç ağırlığı, iyileştirilmiş yakıt ekonomisi ve düşürülmüş emisyon değerleri gibi sebeplerle otomotiv üreticilerinin büyük ilgisini çekmektedir. Karbon liflerin otomotiv performansı kriterlerini karşılaması için en az 172 GPa gerilme modülüne ve 2,7 GPa gerilme mukavemetine sahip olması beklenmektedir (X. Huang, 2009; Salim ve ark., 2018). PAN esaslı karbon lifler üretim şartlarına bağlı olmakla birlikte istenen bu performans kriterlerini rahatlıkla karşılayabilmekte ve özellikle Toray firması tarafından geliştirilen T1100GC® karbon lifleri 7 GPa gerilme mukavemetine sahipken, M60JB® karbon liflerinin gerilme modülü ise 588 GPa olarak ifade edilmiştir (Toray). Buna rağmen araştırmacılar, karbon elyaf maliyetinin kilogram fiyatının 11\$'ın altına indirilememesi durumunda otomotiv endüstrisi için kullanımının kârlı bir seçenek olmayacağı görüşünü benimsemişlerdir (Baker ve Rials, 2013; Gill ve ark., 2017).

Bu açıdan, günümüzde PAN esaslı karbon lifin genel, endüstriyel ve ticari uygulamalarda kullanımını kısıtlayan en önemli sorunu yüksek maliyetidir. PAN esaslı karbon liflerin maliyetinin yüksek olmasının iki sebebi vardır. Birincisi, yaklaşık olarak karbon elyaf maliyetinin %50'sine karşılık gelen PAN öncüsünün üretimi yani hammadde maliyetinin yüksekliğidir (Ribeiro ve ark., 2015). Diğeri ise, stabilizasyon ve karbonizasyon gibi ısıl işlemlerinde içinde bulunduğu yüksek enerji tüketimlerinden kaynaklanan üretim maliyetleridir. Karbon lif üretim maliyetleri içerisinde en fazla zaman alan ve en fazla enerji tüketiminin gerçekleştiği aşama termal stabilizasyon aşamasıdır. Bu aşama iyileştirme çalışmaları için en büyük potansiyele sahip aşama olarak görülmektedir (Maghe ve ark., 2016). PAN esaslı karbon lifin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve üretim süresini kısaltarak üretim maliyetlerini azaltmak amacıyla proses parametrelerinin optimizasyonu ve alternatif stabilizasyon yöntemleri üzerine bir çok bilimsel çalışma yapılmıştır. Bu derleme çalışmada; PAN esaslı karbon lif üretim süreci hakkında genel bilgi verilmiş olup ayrıca karbon lif mekanik özelliklerini iyileştirmeye ve PAN esaslı liflerin termal stabilizasyon süresini kısaltarak oluşacak karbon lif maliyetini azaltmaya yönelik geliştirilen alternatif stabilizasyon yöntemleri incelenmiştir.

2. PAN ESASLI KARBON LİF ÜRETİMİ

2.1. PAN Polimerizasyonu ve Lif Çekimi

Şekil 1'de akrilik lif üretim aşaması incelendiğinde, öncelikle akrilonitrilin polimerizasyonu gerçekleştirilmeli ve ardından elde edilen poliakrilonitril makromoleküllerinin çeşitli lif çekimi yöntemleriyle filament formunda elde edilmesi gerekmektedir. PAN lifleri yapısı gereği en az %85 akrilonitril monomeri içermektedir. %100 oranda akrilonitril içeren

akrilik liflerinin işlenebilirliğinin zor olması nedeniyle ticari anlamda üretimi elverişli değildir. Bu nedenle, akrilik liflerin üretimi sırasında genellikle %5-15 arasında değişen oranlarda komonomer kullanılmaktadır (Tiyek ve Bozdoğan, 2008).



Şekil 1. Akrilik lif üretim aşamaları

PAN esaslı karbon lifler yüksek çekme mukavemeti ve yüksek karbon verimine sahip olmalarının yanı sıra lif eğrilmesi sırasında lif içerisinde yüksek yönelim ve kristallik özellikleri de göstermektedir. Eğirme koşulları lifin kalitesinin, stabilizasyonunun ve en son karbon lif mekanik özelliklerinin tanımlanmasında çok kritik öneme sahiptir. Yüksek kaliteli bir öncü lif olmadan sadece stabilizasyon süreciyle kaliteli karbon lif elde etmek mümkün değildir. PAN polimerinin bozunma sıcaklığı erime sıcaklığından düşük olduğu için lif üretimi açısından eriyikten çekim yöntemi tercih edilememektedir. Fakat plastikleştiriciler veya uygun kopolimerlerin eklenmesiyle erime sıcaklığı düşürülerek eriyik eğirme yöntemi mümkün hale getirilebilmektedir (Ribeiro ve ark., 2015; Paiva ve ark., 2003; Frushour ve ark., 2006). Karbon lif için üretilen PAN esaslı lifler genellikle eriyik eğirme yöntemi dışında kalan diğer yöntemlerden, çözeltiden çekim (kuru ve yaş çekim) veya kuru-yaş jet çekim (yaş çekim modifikasyonu) yöntemlerinden birisiyle elde edilmektedir. Günümüzde ise, kullanılan eğirme yöntemlerinin %90'ını yaş çekim yöntemi oluşturmaktadır (Fakhrhoseini ve ark., 2018; Khayyam ve ark., 2020).

Yaş çekim yöntemi, bir karbon lif öncü maddesi olarak kullanılacak olan PAN esaslı lif üretiminde en yaygın kullanılan tekniktir. Bu yöntemde polimer çözeltilisinin elde edilebilmesi için dimetil asetamid (DMAc) veya dimetil formamid (DMF) gibi bir çözücü kullanılmaktadır. Uygun çözücü kullanarak hazırlanmış olan polimer çözeltisi düze öncesinde filtrelendir ve ardından koagülasyon banyosu içerisinde yer alan bir düzeden püskürtülerek çözücünün ayrıştırılmasıyla birlikte filament formunda katılaştırılır. Koagülasyon banyosu bir pıhtılaştırıcı görevi gören polimer çekim çözeltilisinde kullanılan çözücü ve su karışımından oluşmaktadır. Koagülasyondan sonra lifler gerdirilir, yıkanır ve en son sarılma işlemi gerçekleştirilir. Gerdirme işlemi moleküler yönelimi arttırarak mekanik özelliklerin iyileşmesine olanak sağlaması sebebiyle ayrıca önem taşımaktadır. Yıkama işlemi ise yüzeyde kalan çözücü kalıntılarının uzaklaştırılmasına yardımcı olmaktadır. Kuru çekim yönteminde, PAN kopolimeri düşük buhar basıncına sahip uygun bir çözücü içerisinde çözülür. Olu-

şan polimer çözeltilisi çözücünün buharlaştırılması için sıcak gaz odasına ekstrüde edilip çözücünün uzaklaştırılmasıyla birlikte filament formunda katılaştırılır. Bu yöntemde sıcaklığın dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bu yöntem çok sayıda filamentten oluşan tow üretimi için uygun değildir. Kuru-yaş jet çekim yöntemi, geleneksel yaş çekim yöntemine çok benzemekle birlikte yaş çekim yönteminin bir modifikasyonu olarak gösterilmektedir. Bu yöntemde, polimer çözeltilisinin ekstrüde edildiği düze sistemi koagülasyon banyosu içerisinde olmayıp yaklaşık 10 mm kadar üzerinde bir hava boşluğunda bulunmaktadır. Bu teknik, çözeltideki polimer zincirlerinin koagülasyon başlamadan önce yönlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Fakat 12000 (12K) filamentten fazla tow üretimi için kullanışlı değildir (Frank ve ark., 2014).

2.2. Termal Stabilizasyon

Karbon lif üretimine uygun olarak elde edilen PAN lifleri lif çekiminin ardından stabilizasyon ve karbonizasyon gibi bir dizi üretim aşamalarından geçerek karbon life dönüştürülmektedir (Şekil 2). Grafitizasyon aşaması ise karbon liflerin kullanım yerinden istenen özellikler göz önünde bulundurularak isteğe bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Stabilizasyon sırasında kullanılan koşullar ortaya çıkan karbon liflerin yapısını ve mekanik özelliklerini belirleyeceği için termal stabilizasyon yüksek performanslı karbon lif üretiminde çok büyük öneme sahiptir (Sedghi ve ark., 2008).



Şekil 2. Karbon lif üretim aşamaları

Termal stabilizasyon aşaması oksidasyon, dehidrojenasyon ve halkalaşma gibi kimyasal reaksiyonların meydana geldiği bir aşama olup genellikle oksijen içeren bir atmosferde 180-300°C arasındaki sıcaklıklarda PAN esaslı liflerin ısıtılmasıyla gerçekleştirilmektedir (Rahaman ve ark., 2007; J. Liu ve ark., 2018; Tajaddod ve ark., 2018; H. Liu ve ark., 2019). Genellikle proses parametrelerine ve öncü lif özelliklerine bağlı olarak çok

fazla zaman alan bir aşama olarak gösterilmektedir. Termal stabilizasyon işlemi sırasında doğrusal makromoleküler yapının aromatik halkalı yapıya dönüşümü gerçekleşmektedir. Dehidrojenasyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için oksidasyona ihtiyaç vardır ve bu nedenle termal stabilizasyon aşamasında oksitleyici ortam olarak hava kullanılmaktadır. Havanın içerisindeki oksijenin polimer yapısına nüfuz etmesiyle birlikte oksidasyon gerçekleşmiş olur. Dehidrojenasyon ve halkalaşma reaksiyonlarından farklı olarak oksidasyon reaksiyonu polimer yapısında farklı formlarda bulunabilmesi nedeniyle karmaşık bir reaksiyon olarak kabul edilmektedir (Coleman ve Sivy, 1981; Xue ve ark., 2013). Hidrojenin, su formunda oksijenle birlikte polimer yapısını terk ettiği ve karbon zincirlerini stabilize eden iki karbon atomu arasında bir çift bağ ($C=C$) oluşturduğu bir diğer reaksiyon ise dehidrojenasyondur. Bu reaksiyon sonrası oluşan çift bağ daha iyi bir termal stabilite sağlamakla beraber karbonizasyon sırasında artan yüksek sıcaklıklarda zincir kesilmelerini azaltmaktadır. Stabilizasyon aşamasındaki en önemli reaksiyon halkalaşma reaksiyonu olarak gösterilmektedir.

Termal stabilizasyon sırasındaki ısı işlemler, PAN polimer zincirlerinde bazı kimyasal değişimlere yol açarak karbon-azot çift bağı ($C=N$) ile yoğunlaştırılmış halkalı bir yapının oluşmasıyla sonuçlanmaktadır (Clarke ve Bailey, 1973). Bu yapı polimeri, eski nitril bağına ($C\equiv N$) kıyasla çok daha termal olarak kararlı hale getirmektedir (Damodaran ve ark., 1990). Stabilizasyon işlemleri sırasında PAN esaslı liflerin renginde değişimler meydana gelmekte ve kimyasal reaksiyonlar, stabilize lifin renginin beyazdan, önce sarı ve kahverengiye son olarak da siyaha dönüşmesinin nedeni olarak gösterilmektedir (X. Zhang ve ark., 2020). Stabilizasyon esnasında uygulanan her bir işlem direkt olarak nihai karbon lif özelliklerini etkileyeceği için bu aşamanın optimum şekilde tamamlanması önemlidir ve iyi bir stabilizasyon aşamasıyla birlikte PAN esaslı lifler bir sonraki aşama olan karbonizasyon sırasında maruz kalacakları yüksek sıcaklıklara dayanıklı polimer yapısına dönüştürülmüş olmaktadır.

Aynı zamanda stabilize olmuş PAN lifleri karbonize olmadan da tekstil uygulamalarında iplik, kumaş veya dokusuz (non-woven) yüzey üretmek için değerlendirilebilmektedir. SGL firması tarafından üretilen PANOX® ve Zoltek firması tarafından üretilen ZOLTEK OX® bu amaçla uçaklarda, trenlerde ve otomobillerde yangını engelleyici kumaş olarak veya itfaiyeci, yarış pilotları ve silahlı kuvvetler personellerinin kullanımı için geliştirilmiş olan koruyucu giysi olarak kullanılmaktadır. Tablo 1'de ticari olarak kullanılan bazı stabilize PAN liflerine ait teknik özellikler gösterilmiştir. LOI değerlerine bakıldığında bu ürünlerin ısıya karşı dayanıklılıkları açık bir şekilde anlaşılmaktadır.

Tablo 1. Bazı ticari stabilize PAN filamentlerine ait özellikler (SGL Carbon ve Zoltek)

	PANOX®	ZOLTEK OX®
Filament sayısı	320k	300k
İplik numarası	1,7 dtex	1,7 dtex
Yoğunluk	1,39 g/cm ³	1,40 g/cm ³
Gerilme muk.	230 Mpa	240-300 Mpa
LOI	> %45	~55%
Lif çapı	12µ	12,5 µ

2.3. Karbonizasyon

Stabilize olmuş PAN lifi yapısındaki karbon olmayan elementlerin çeşitli gazlar formunda polimer yapısından uzaklaştırılması için karbonize edici ısı işlemlerden geçirilmesi ve karbon içeriğinin arttırılması işlemine karbonizasyon denilmektedir. Karbonizasyon işlemi genellikle inert bir atmosfer olan azot ortamında 1000-1500°C sıcaklıkları arasında gerçekleştirilmektedir (Rajalingam ve Radhakrishnan, 1991; Dalton ve ark., 1999; W. Zhang ve Li, 2005; Ngoc ve Hong, 2013; Hao ve ark., 2018). Kütle transferinin yoğun olduğu ve ön karbonizasyon olarak adlandırılan 600°C'ye kadar ki ısı işlemlerde nispeten daha düşük ısıtma hızları kullanılmaktadır. Daha iyi mekanik özelliklere sahip bir karbon lif elde edebilmek için optimum karbonizasyon koşulları gereklidir. Karbonizasyon sürecindeki en önemli parametrelerden biri mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyen sıcaklıktır. Yüksek gerilme mukavemetine sahip karbon lif üretmek için karbonizasyon sıcaklığının 1500°C'yi aşmaması gerektiği belirtilmektedir. Bu noktadan sonra sıcaklığın artmasıyla gerilme mukavemeti azalırken, modül değeri yüksek karbon lifler elde edilmektedir. Karbon lifleri son ısı işlem sıcaklıklarına göre sınıflandıracak olursak (Bhatt ve Goel, 2017);

- Yüksek modüllü karbon lif: Karbonizasyon sıcaklığının 2000°C'nin üzerinde olduğu durumlarda elde edilen liflerdir. Bu gruptaki karbon liflerin modül değeri 450 GPa'nın üzerinde olmaktadır.
- Orta modüllü karbon lif: Karbonizasyon sıcaklığının 1500°C ve üzeri olduğu durumlarda elde edilen liflerdir. Bu gruptaki karbon liflerin modül değeri 200-350 GPa arasında olmaktadır.

- Düşük modüllü karbon lif: Karbonizasyon sıcaklığının 1000-1500°C arasında olduğu durumlarda elde edilen liflerdir. Bu gruptaki karbon liflerin modül değeri 100 GPa'dan düşük olmaktadır.

2.4. Grafitizasyon ve Yüzey İşlemleri

Çok daha yüksek modüllü bir karbon lif üretimi için sıcaklığın 3000°C'ye kadar çıkarılması ve liflerin bir grafitleşme sürecinden geçirilmesi gerekmektedir. Bu süreç esnasında genellikle argon atmosferi kullanılmaktadır. Grafit liflerinde yapının yaklaşık %99'u karbon olmakta (Rahaman ve ark., 2007; Kaburagi ve ark., 2003; Laffont ve ark., 2004) ve aynı zamanda grafitleşme karbon yapının grafit yapıya dönüştürülmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Grafitizasyon ile yüksek modüllü lifler elde edilebilmekte ve bu nedenle zift esaslı karbon lifler için daha uygun bir aşama olarak görülmektedir.

Takviyeli bir kompozit malzeme oluşturmak için matris reçineleri ve karbon lif arasındaki adhezyonu arttırmak gerekmektedir. Yüzey işlemleri ile karbon lif yüzeyi pürüzlendirilir ve matris reçinesinin yapıştırılması için yüzey alanı arttırılır. Bu durum, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirerek işlenmemiş liflere kıyasla yaklaşık 2 kat daha fazla kesme mukavemetine sahip bir kompozit malzeme ile sonuçlanmaktadır (Nakao ve Uno, 1989).

3. KARBON LİF ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Karbon lif üretiminin her bir aşaması nihai karbon lif özelliklerini etkileyen çok sayıda birbirinden bağımsız değişkene sahiptir. Bu anlamda karbon liflerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve üretim maliyetlerinin azaltılmasına yönelik birçok modifikasyon çalışması yapılmış ve yeni yaklaşımlar üzerinde durulmuştur. Bu çalışmada; karbon lif özelliklerini etkileyen faktörler hammadde özelliklerine ve proses parametrelerine bağlı faktörler olmak üzere iki ayrı başlık altında değerlendirilmiştir.

3.1. Hammadde Özelliklerine Bağlı Faktörler

Homopolimer PAN, yapısı gereği güçlü nitril dipol etkileşimleri nedeniyle kolayca çözülemez ve bu durum lif oluşumunu ve lifin işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sorunların çözümü için PAN'ın çeşitli monomerler ile kopolimerizasyonu sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Kaur ve ark., 2016; Choi ve ark., 2019). Normal tekstil amaçlı PAN, yaklaşık % 15 kopolimer içerirken, karbon lif amaçlı PAN, % 8'den daha az kopolimer içermektedir. Tablo 2'de, kullanılan bazı komonomerlere ait çalışmalara yer verilmiştir.

Tablo 2. PAN esaslı karbon lif üretiminde kullanılan bazı komonomerler

Komonomer	% Kullanım	Açıklama
Metil akrilat (MA)	% 2 ve %3 (mol)	İki farklı % mol içeriğine sahip MA kullanımının karbon lif özelliklerine etkisi (Bang ve ark., 1998)
Akrilik asit (AA) Metakrilik asit (MAA) İtakonik asit (IA)	% 1-5 (mol)	Karbon lif üretiminde üç farklı asit monomerin etkinliği IA>MAA>MA (Gupta ve ark., 1996)
2-etilheksil akrilat (2-EHA) İtakonik asit (IA)	% 1,5 2-EHA + % 0,5 IA (mol)	Elde edilen kopolimer PAN yapısının karbon lif üretimine etkisi (Tsai ve Lin, 1991a)
Metil akrilat (MA) Etil akrilat (EA) Bütül akrilat (BA) 2-etilheksil akrilat (2-EHA)	% 3,5 (mol)	Aynı % mol içeriği ile dört farklı monomerin yan zincir uzunluğunun karbon lif özelliklerine etkisi (Tsai ve Lin, 1991b)
Metil akrilat (MA) İtakonik asit (IA)	% 4,7 MA + % 1,3 IA (ağırlık)	Modifiye PAN'ın karbon lif üretimine etkisi (Farsani ve ark., 2007)
İtakonik asit (IA)	% 0,5-3 (mol)	Beş farklı % mol içeriğine sahip IA kullanımının karbon lif özelliklerine etkisi (Fu ve ark., 2016)
Krotonik asit (CA) İtakonik asit (IA)	% 1 ve % 2 (ağırlık)	IA ve CA monomerlerinin kullanımının stabilizasyona etkisi (Lei ve ark., 2014)
İtakonik asit (IA)	% 0,5 ve % 1 (mol)	Farklı % mol içeriğine sahip IA kullanımının karbon lif üretimine etkisi (H. Zhang ve ark., 2020)
Etilen sülfonik asit (ESA) İtakonik asit (IA)	% 2 (mol)	ESA ile IA monomerlerinin karbon lif özelliklerine etkisinin karşılaştırılması (H. Liu ve ark., 2018)
2-akrtamido-2-metilpropan asit (AMPS) İtakonik asit (IA)	% 2 (mol)	AMPS ile IA monomerlerinin karbon lif özelliklerine etkisinin karşılaştırılması (H. Liu ve ark., 2019)
Vinil asetat (VA)	% 6 (mol)	Sürekli ekstrüzyon işlemiyle lif çekiminin karbon lif özelliklerine etkisi (Ribeiro ve ark., 2015)
İtakonik asit (IA) Guanidinyum itakonat (GIA)	% 0,61 ve % 0,88 (mol)	GIA gibi yeni bir monomer kullanımının stabilizasyona etkisi (Moskowitz ve ark., 2020)

Kullanılan komonomerler, PAN homopolimerinden elde edilen karbon liflerden daha yüksek mekanik özelliklere sahip karbon lifler üretilmesini ve halkalaşma reaksiyonunun başlangıç sıcaklığının düşmesini sağlayarak stabilizasyona olumlu yönde katkı sağlamaktadır (Naskar ve

ark., 2005). Metil akrilat (MA), vinil asetat (VA), itakonik asit (IA), akrilik asit (AA) ve 2-etil heksil akrilat (2-EHA) gibi komonomerler, bir iyonik halkalaşma mekanizması yoluyla stabilizasyon sürecini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bu bileşenler arasında itakonik asit, yapısındaki iki karboksilik asit grubunun varlığı nedeniyle nitril halkalaşma reaksiyonunu katalize etmede ve kömürleşme verimini (char yield) arttırmada etkili bir monomer olarak gözükmektedir. Buna rağmen, H. Liu ve ark., (2018), ESA monomerinin IA monomerine kıyasla nitril gruplarının iyonik halkalaşmasını daha kolay başlattığını ve yine IA monomeriyle karşılaştırıldığında yüksek kömürleşme verimi gibi daha iyi bir termal etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Daha sonra yakın zamanda yaptıkları bir diğer çalışmayla, ESA monomerinin maliyetinin yüksek bulunması ve endüstriyel uygulamalarının kısıtlanması sebebiyle yine bir sülfonik asit grubu içeren daha düşük maliyetli AMPS monomeriyle PAN'ı kopolimerize etmişler ve karbon lif üretiminde umut verici bir gelişme olarak paylaşmışlardır (H. Liu ve ark., 2019).

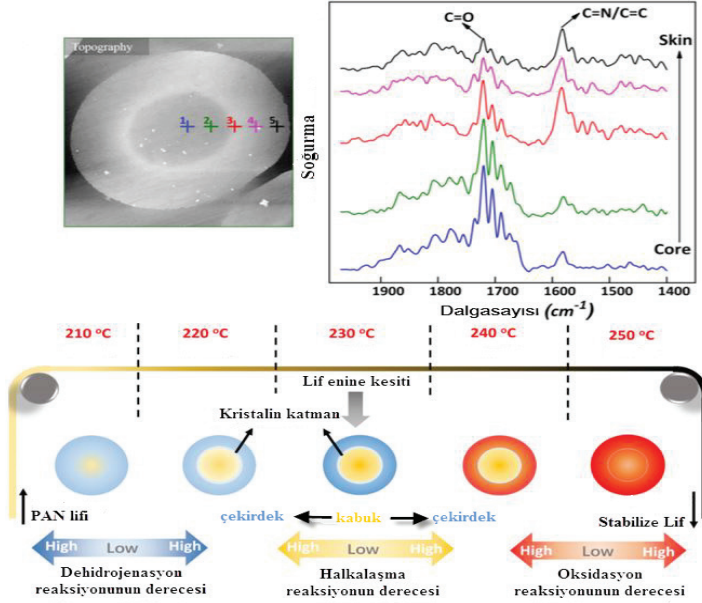
Termal stabilizasyon ve karbonizasyon gibi ısı işlemlerde homojenlik sağlanabilmesi için lif çapı önemli bir parametredir. Isıl işlemler sonrasında lifte meydana gelen kütle kayıplarına bağlı olarak lif çapı azalma eğilimi göstermektedir. Karacan ve Erdoğan, (2012) PAN esaslı liflerin stabilizasyonuna yönelik yaptıkları çalışmada 21,5 µm lif çapına sahip bir PAN öncü lifi kullanmış ve ısı işlemlerin sonucunda, stabilizasyon süresine de bağlı olmak üzere lif çapında yaklaşık % 38'lik bir azalma olduğunu belirtmişlerdir. Hava ortamında gerçekleştirilen stabilizasyon işlemleri sırasında oksijen penetrasyonu liflerin dış yüzeyinden iç kısımlarına doğru gerçekleşmektedir. Bu durum çoğu stabilizasyon işlemi sırasında lifte kabuk-çekirdek (skin-core) formunun oluşmasına sebep olmakta ve nihai karbon liflerin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Termal stabilizasyon işlemleri sırasında optimum olarak belirlenen sıcaklık ve süre, oluşan bu kabuk-çekirdek formunun iyileşmesini olumlu yönde etkilerken tamamen ortadan kaldıramamaktadır. Literatüre bakıldığında, kabuk-çekirdek yapısının oluşumuna yönelik üç teori üzerinde durulmaktadır. Bunlar (Nunna ve ark., 2017; Khayyam ve ark., 2020);

- Liflerin enine kesitleri boyunca oksijen içeriğinin homojen olmayan dağılımı,
- Çekirdekte daha yüksek bir halkalaşma derecesinin daha yüksek miktarda ekzotermik ısıyı tetiklediğini ve bunun da üretilen ısı miktarı ile termal stabilizasyon sırasında lif çekirdeğinden yayılan ısı arasında bir dengesizliğe yol açtığı,

- Kabuk-çekirdek yapısal farklılığının öncü maddede halihazırda var olduğu, eğirme işleminde olduğu ve termal stabilizasyon işlemi sırasında ilerlediği şeklindedir.

Küçük lif çapına sahip PAN öncülerinin kullanılması, kabuk-çekirdek yapısının olumsuz etkisini azaltmak açısından önemlidir. Oksijen, küçük çaplı liflerde yüzeyden çekirdeğe kolaylıkla yayılabilir ve liflerin homojenlik gelişimine fayda sağlayabilmektedir. Kong ve ark., (2014) sırasıyla 8,6 - 6,9 ve 6,1 µm olmak üzere üç farklı lif çapına sahip PAN öncüsünü aynı koşullar altında stabilize ve karbonize ettikten sonra en küçük lif çapına sahip PAN lifinde kabuk-çekirdek yapısının oluşumunun tamamen giderildiğini ifade etmişlerdir.

Fakat stabilize PAN liflerinin kabuk-çekirdek yapısının oluşum mekanizması hâlâ tam olarak açıklanamamıştır. Bu nedenle, Sha ve ark., (2019) stabilize PAN liflerinin enine kesitindeki kimyasal grup dağılımını haritalamak ve tüm kesit boyunca kabuk-çekirdek yapısının oluşum mekanizmasını ortaya çıkarmak için foto-indüklenmiş kuvvet mikroskobu adlı nano ölçekli çözünürlüğe sahip güçlü bir cihaz ile bu süreci incelemişler ve Şekil 3 ile özetlemişlerdir. Verilen görselde, stabilize PAN lifinin kabuk-çekirdek yapı oluşum mekanizması gösterilmiş olup herbir reaksiyon farklı bir renk ile temsil edilmiştir (Mavi: Dehidrojenasyon, Sarı: Halkalaşma, Kırmızı: Oksidasyon). Buna göre; kabuk-çekirdek kimyasal yapısının oluşumuna, çekirdek bölgesindeki halkalaşma alanı neden olurken, kabuk kısmı oksijenle temas eden dehidrojenasyon alanı ile temsil edilmiştir. Bu durum, kabuk ve çekirdek kısımlarındaki heterojen oksijen dağılımına bağlanabilir. Bunun yanı sıra, kabuk ile çekirdek arasındaki ara yüzeyde oluşan kristal tabaka ile yapısal heterojenlik de artmaktadır. Gelişen stabilizasyon süreci ile kristal tabaka oksidasyonla ortadan kaldırılabilmekte ve lif içerisinde artan oksidasyon derecesi, lifin görünüşte homojen olmasını sağlayabilmektedir.



Şekil 3. Stabilize edilmiş PAN lifinin kabuk-çekirdek yapısı gösterimi (Sha ve ark., 2019)

PAN liflerine lif çekimi sırasında uygulanan gerdirme işlemleri de öncü olarak kullanılacak olan liflerin çaplarının azaltılmasını olumlu yönde etkilemektedir. Özellikle eğirme sonrasında gerçekleştirilen gerdirme işlemleri sadece lif çapını azaltmak için değil, aynı zamanda PAN makro moleküllerinin moleküler oryantasyonunu da arttırarak daha iyi mekanik özelliklere sahip bir öncü madde elde etmek için de yapılmaktadır. Genellikle yüksek lif çapına sahip öncü maddeler ile lif enine kesitindeki oksijen içeriğinin homojen olmamasına bağlı olarak yüksek mukavemete sahip karbon lifler elde etmek zorlaşmakta ve bu liflerin stabilizasyon işlemleri uzun süreler almaktadır. Bu açıdan, karbon lif üretiminde kullanılacak PAN öncü maddesinin seçiminde yüksek performanslı ve daha az maliyetli bir ürün elde etmek için lif çapının da dikkate alınması önem taşımaktadır.

PAN öncüsünün molekül ağırlığı da karbon lif özelliklerine etki eden faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Tsai ve Lin, (1991) yapmış oldukları çalışmada molekül ağırlığının öncü liflerin morfolojisi ve son karbon lif özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve moleküler ağırlıktaki artışın, kristal boyutunda ve tercih edilen yönelimde bir artışa ve ortalama gözenek çapında bir azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu azalmayı, PAN öncüsünün ve bunun sonucunda ortaya çıkan karbon liflerin mekanik özelliklerini iyileştirebileceğini savunmuşlardır.

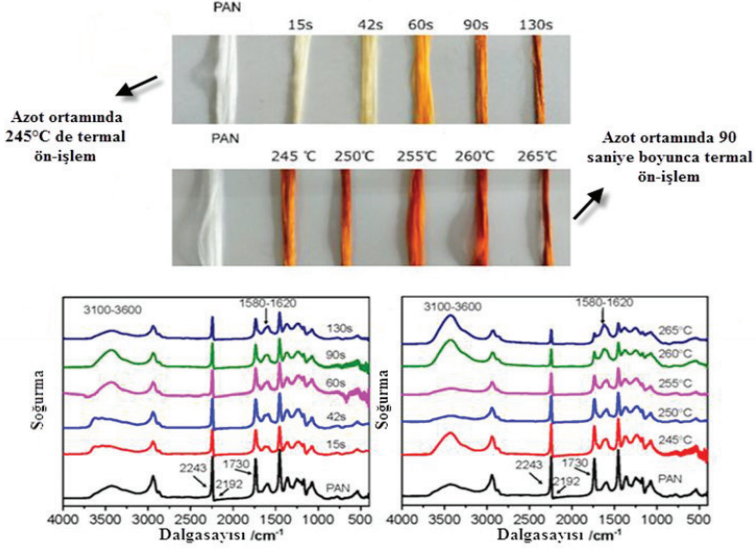
3.2. Proses Parametrelerine Bağlı Faktörler

Karbon lif üretim süreçleri içerisinde özellikle termal stabilizasyon aşaması, zaman alan ve enerji tüketiminin fazla olduğu bir aşama olması sebebiyle modifikasyon çalışmalarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır (Krishnan ve ark., 2018). Proses parametrelerinin optimize edilmesi bu aşamadaki gereksiz enerji tüketimlerinin önlenmesini sağlayacak olup aynı zamanda da karbon lif maliyetlerinin azalmasına olumlu yönde katkı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra, karbonizasyon aşamasını içeren çalışmalar ise daha çok karbon lif mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yöneliktir. Atmosfer, sıcaklık, süre, ısıtma hızı ve gerdirme gibi parametreler PAN esaslı karbon lif üretiminde üzerinde en fazla modifikasyon çalışması yapılan parametreler olarak belirlenmiştir. Karbon lif üretimi birçok değişken parametreye bağlı olması nedeniyle, değişkenlik gösteren bu parametrelerin hepsinin bir bütün olarak değerlendirilerek belirlenmesi nihai karbon lif özellikleri ve maliyeti açısından çok önemlidir. Her öncü PAN, kendine özgü olarak belirlenen şartlar altında stabilize ve karbonize edilmekte ve ticari anlamda da firmalar tarafından bu üretim süreçleri sır gibi saklanmaktadır.

Belirlenen proses parametreleri içerisinde atmosfer önemli parametrelerden biridir. Genel olarak, termal stabilizasyon sırasında hava atmosferi tercih edilmektedir. Hava atmosferi dışında saf oksijen, amonyak, ozonla zenginleştirilmiş hava, kükürt dioksit (SO_2), brom-oksijen karışımı (Br_2/O_2), hidroklorik asit buharı-oksijen karışımı (HCl/O_2), azot ve argon gibi atmosferlerin kullanımı termal stabilizasyon aşamasında denenmiştir. Karbonizasyon aşamasında ise, azot veya argon gibi inert bir atmosfer tercih edilmektedir. Karbonizasyon sıcaklığı kullanılacak olan atmosferi etkilemektedir. Azot, $2000^\circ C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda makromolekülde bulunan karbon ile reaksiyona girerek siyanojen gibi toksik bir gaz oluşumuna sebep olduğu için yüksek karbonizasyon sıcaklıklarında veya grafitizasyon işlemleri sırasında argon atmosferinin kullanılması gerekmektedir (Park, 2015).

T. Sun ve ark., (2009) PAN liflerinin stabilizasyonuna atmosferin etkisini incelemek için oksijen içerikleri değişen beş farklı atmosfer ortamı (%0, %20, %50, %70 ve %100) hazırlamışlardır. Atmosferdeki oksijen içeriğinin artmasıyla, dehidrojenasyon, oksidasyon ve çapraz bağlanma gibi reaksiyonların gerçekleşmesi kolaylaşmış, fakat gerilme mukavemeti de azalmıştır. Oksijen içeriğinin %0 olduğu azot ortamında gerçekleşen stabilizasyonda ise gerilme mukavemetinin tüm numuneler içerisinde en düşük olduğunu belirtmişlerdir. Qin ve ark., (2012) PAN liflerini stabilizasyon öncesinde azot ortamında ısıtma işlemi tabi tutmuş ve ardından hava ortamında stabilize etmişlerdir. Azot ortamında yapılan bu ön işlemin stabilize liflerde stabilizasyon derecesini %2,9 arttırdığını, $900^\circ C$ 'de ki karbon verimini %1,7 arttırdığını ve mekanik özellikleri geleneksel yön-

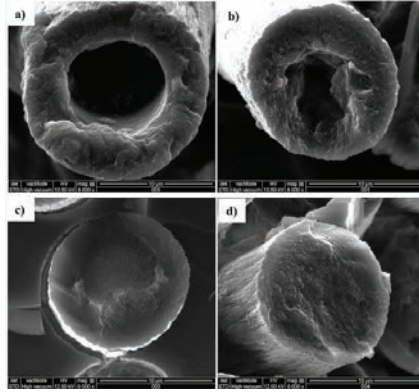
temlerle elde edilen karbon liflere kıyasla iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Dang ve ark., (2020) stabilizasyon sürecinden önce azot ortamında hızlı bir termal ön işleme PAN liflerinin yapısında meydana gelen hem fiziksel hem de kimyasal değişimleri Şekil 4'de göstermişlerdir.



Şekil 4. Termal stabilizasyon sonrası azot ortamında PAN lifin kimyasal yapı değişimi ve FT-IR analizi (Dang ve ark., 2020)

Verilen görsele göre; PAN lifinin fiziksel yapısında sürenin ve sıcaklığın etkisiyle birlikte bazı renk değişimleri gözlenmiş ve bu renk değişimlerini olası stabilizasyon reaksiyonlarına bağlamışlardır. Aynı zamanda, verilen FT-IR spektrumlarına göre, özellikle 2243 cm^{-1} 'deki nitril gruplarına ait karakteristik titreşim piklerinin şiddetinin süre ve sıcaklığın etkisiyle azaldığı ve $1580\text{--}1620\text{ cm}^{-1}$ dalgasayıları arasında halkalı --C=N-- ve --C--N-- gruplarının oluştuğu belirtilmiştir. Bu nedenle, hal-kalaşmanın azot ortamındaki termal ön işleme sırasında meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Bu ön ısı işlemler geleneksel stabilizasyon sürecini kısaltarak zamandan ve enerjiden tasarruf edilmesini sağlamış ve karbon lif maliyetini azaltmıştır.

PAN liflerinin termal stabilizasyonu için oksijene ihtiyaç vardır. Fakat oksijen içeriğinin çok yüksek olması da karbon liflerinin performansını olumsuz etkilemektedir. Ortamdaki oksijen içeriğinin optimum düzeyde belirlenmesi daha yüksek performanslı karbon lifler üretmek için çok önemli olmaktadır. J. Wang ve ark., (2016) karbon liflerin gerilme mukavemetine göre termal stabilizasyon atmosferindeki optimum oksijen içeriğinin % 15-21 arasında olması gerektiğini belirtmiş olup, bu durumu Şekil 5'deki SEM görüntüleriyle desteklemişlerdir.



Şekil 5. Farklı oksijen içeriğine sahip stabilize PAN liflerin SEM görüntüleri (X8000) (a.%5 b.%10 c.%15 d.%21) (J. Wang ve ark., 2016)

Karbon elyaf üretiminde en önemli parametrelerden bir diğeri de sıcaklıktır. Stabilizasyon sıcaklığı yüksek olursa; bu durum, liflerin fazla ısınmasına yol açarken, stabilizasyon sıcaklığının düşük olması ise; yetersiz stabilizasyona sebep olabilmektedir (Khayyam ve ark., 2015). Her iki durum da düşük performanslı karbon lif ile sonuçlanacaktır. Stabilize lif özelliklerinin direkt olarak elde edilecek karbon lif özelliklerini etkileyecek olmasından dolayı, stabilizasyon aşamasındaki sıcaklık parametresi karbonizasyon aşamasındaki sıcaklık parametresinden çok daha önemli bulunmaktadır. PAN liflerinin termal stabilizasyon işleminde sıcaklık genellikle 180-300°C arasında değişmektedir. Karbonizasyon işleminde ise yüksek gerilme mukavemeti için sıcaklık 1500°'nin çok üzerine çıkarılmazken, yüksek elastik modül için ise çok daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç vardır.

Wu ve ark., (2018) PAN liflerini 180-260°C arasındaki sıcaklıklarda hava ortamında stabilize etmiş ve ardından stabilize olan liflere 270-345°C arasında ki sıcaklıklarda azot ortamında son bir ısıl işlem uygulamışlar ve en son 1350°C'de karbonize etmişlerdir. Karbonizasyon öncesi azot ortamında uygulanan ısıl işlemlerin artan sıcaklıkların etkisiyle stabilizasyon derecesini arttırdığını ve 300°C'deki ısıl işlemlerin optimum olarak en yüksek oryantasyon derecesine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Hameed ve ark., (2016) PAN liflerini hava ortamında 225-255°C arasındaki sıcaklıklarda stabilize etmiş ve ardından azot ortamında 487-800°C arasındaki düşük karbonizasyon sıcaklıklarında karbonize etmişlerdir. 800°C'deki karbonizasyon sonrasında, stabilize liflerde %66 olan aromatisasyon indeksinin %99'a çıktığını belirtmişlerdir.

Isıtma hızı ve bekleme süresi de karbon lif üretiminde önemli parametrelerdendir. Termal stabilizasyon sırasında ısıtma hızı ne kadar yük-

sekse, stabilizasyon o kadar kısa sürebilir ama bu durum yetersiz stabilizasyonla sonuçlanacak ve karbon lif mekanik özelliklerini olumsuz olarak etkileyecektir. Aksine, çok küçük ısıtma hızı ise, stabilizasyon süresinin çok fazla uzamasına ve aşırı stabilizasyona sebep olup yine karbon lif mekanik özelliklerini olumsuz etkileyecektir. Termal stabilizasyon için optimum ısıtma hızı $5^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ 'yı geçmemelidir (Hou ve ark., 2008). Termal stabilizasyon aşamasında halkalaşma, oksidasyon ve dehidrojenasyon gibi kimyasal reaksiyonların ekzotermik olması nedeniyle, kritik işlem sıcaklığına kadar kısmen yüksek ısıtma hızları kullanılabilir de, özellikle 180°C 'den sonra daha yavaş ısıtma hızları (ısıtma rampası) kullanılmaktadır. Farklı bir yöntem olarak, stabilizasyon işlemi sabit sıcaklıkta uzun süreli beklemelemlerle de gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum, stabilizasyon süresini arttırması ve maliyetli olması nedeniyle ticari olarak çok fazla kabul görmemektedir. Meinel ve ark., (2017) stabilizasyonun ekzotermik bir süreç olması ve yapı oluşumunun aşırı ısınmaya karşı çok hassas olmasından dolayı, ısıtma hızının kritik bir faktör olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda, bekleme sıcaklığını düşürerek, reaksiyon hızının düşürülebileceğini ve bu durumun yüksek ısıtma hızlarında bile stabilizasyonun kontrol edilebilirliğini kolaylaştırdığını ifade etmişlerdir. Karbonizasyon işleminde ön karbonizasyon olarak bilinen 600°C 'ye kadar ki sıcaklıklarda polimer yapısından su, metan, amonyak, karbon monoksit, karbon dioksit ve hidrojen siyanür gibi gazların çıkışını yavaşlatmak ve polimer yüzeyin de oluşması muhtemel kusurları azaltmak için daha düşük ısıtma hızlarının kullanılması gerekmektedir. Ön karbonizasyon sıcaklığından sonraki sıcaklıklarda daha yüksek ısıtma hızları kullanılabilir. Genel olarak karbonizasyon sırasında stabilizasyona göre daha yüksek ısıtma hızlarının kullanılması mümkündür.

Karbon lif üretim sırasında ısı işlemlerin etkisiyle lifler büzülme ve moleküler oryantasyonunu kaybetmektedir. Bu durum karbon lif mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Hem liflerde oluşacak büzölmelerin önlenmesi hem de daha yüksek moleküler oryantasyon için lifler üretim sırasında çeşitli aşamalarda gerdirme işlemine maruz kalır ve böylece mekanik özellikleri daha yüksek bir karbon lif üretmek mümkün olmaktadır. Bunun yanı sıra, L. Wang ve ark., (2011) stabilizasyon sırasında lifler üzerine uygulanan gerilimin polimer yapısındaki nitril gruplarının daha iyi konumlanmasını sağlayarak halkalaşma reaksiyonlarının oluşumunu kolaylaştırdığını belirtmişlerdir. Yun ve ark., (2009) liflere uygulanan gerilimin artmasıyla lif çapının azaldığını ve daha yüksek modül değerine sahip karbon liflerin elde edilebileceğini göstermiştir. Salim ve ark., (2018) artan gerilimin bir sonucu olarak hem düşük sıcaklık (LT) hem de yüksek sıcaklıkta ki (HT) karbonizasyonun, liflerin gerilme modüllerinde açık bir artışa sebep olduğunu belirtmişlerdir.

PAN liflerinden, istenen mekanik özelliklere sahip karbon lif elde edebilmek için stabilizasyon işleminin optimum düzeyde yapılması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda Soulis ve ark., (2020) yapmış oldukları derleme çalışmada; kullanılan PAN polimer yapısına göre değişmekle beraber stabilize lifin oksijen içeriğinin, %8-21 arasında ve stabilize lif yoğunluğunun ise 1,34-1,40 g/cm³ arasında olması gerektiğini göstermişlerdir. Karbon lif üretiminde, özellikle termal stabilizasyon sırasında optimum proses parametrelerini kullanarak stabilizasyon süresi azaltılabilir ve enerji maliyetleri düşürülebilir. Golkarnarenji ve ark., (2018) PAN liflerinin stabilizasyon sürecinin enerji optimizasyonu ile düşük maliyetli karbon lif üretimi üzerine yaptıkları çalışmalarında, kullandıkları modelleme tekniğiyle optimum parametrelerde yaklaşık %48 enerji tasarrufu yapılabileceğini göstermişlerdir.

4. ALTERNATİF STABİLİZASYON YÖNTEMLERİ

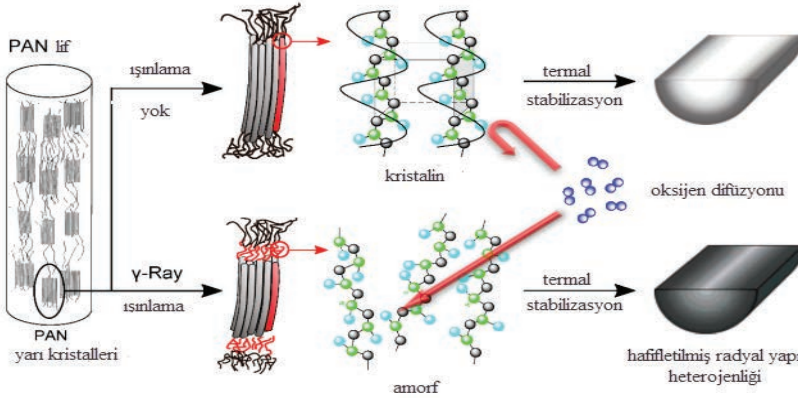
Karbon lif üretiminde en önemli aşama olarak kabul edilen termal stabilizasyon aşaması, PAN esaslı liflerde bazı yapısal ve kimyasal değişikliklere sebep olmaktadır. Başlangıçta doğrusal bir polimer olan PAN, karbonizasyon aşamasındaki yüksek sıcaklıklara dayanabilmek için çapraz bağlı, halkalı bir polimer yapısına dönüştürülür. Çok önemli olmasına rağmen stabilizasyon aşaması, karbon lif üretiminde zaman alan, karmaşık ve maliyetli olan bir aşama olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle, çok fazla enerji tüketiminin olduğu geleneksel stabilizasyon işlemleri yerine alternatif stabilizasyon yöntemleri geliştirilmiş ve bu yöntemler PAN esaslı liflerin termal stabilizasyonu için gereken süreyi azaltarak karbon lif maliyetinin düşürülmesine olumlu yönde katkı sağlamıştır. Bu alternatif stabilizasyon yöntemlerini kimyasal ve fiziksel yöntemler olarak iki farklı şekilde değerlendirebiliriz.

Kimyasal yöntemler, stabilizasyon sürecini hızlandırmak için stabilizasyondan önce PAN liflerinin çeşitli kimyasal maddelerle ön işlemden geçirilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Termal stabilizasyondan önce gerçekleştirilen kimyasal işlemler, PAN liflerinin ısı direncini ve termal kararlılığını arttırmaya yönelik olarak kullanılan etkili modifikasyon yöntemlerinden biridir. Kimyasal yöntemler, genellikle bu kimyasalların sulu çözeltileri içerisinde PAN liflerinin geçirilmesi şeklinde gerçekleşmekte ve elde edilen modifiye PAN lifleri belirlenen şartlar altında stabilize edilmektedir. J. Sun ve ark., (2005) stabilizasyondan önce PAN liflerini; amonyum dibazik fosfat, amonyum dihidrojen fosfat, triamonyum fosfat, fosforik asit ve meta fosforik asit gibi fosfor içeren beş farklı kimyasal maddenin ağırlıkça %4 konsantrasyonundaki sulu çözeltileri içerisinde 30 dakika bekletmiş ve ardından hava atmosferinde 230°C'de stabilizasyonunu gerçekleştirmiştir. Jie ve Wangxi, (2005) sulu potasyum permanganat içerisinde emdirilmiş PAN liflerini hava ortamında 220-300°C arasındaki sıcaklıklarda stabilize etmiş ve ardından azot ortamında 1350°C'de kar-

bonizasyonunu gerçekleştirmiştir. Modifiye olmuş PAN liflerinin daha düşük sıcaklıkta tamamen stabilize olabileceğini ve potasyum permanganatın stabilizasyon süresini azaltan bir katalitik etki gösterdiğini belirtmişlerdir. Karacan ve Erdoğan, (2011a; 2011b; 2012) PAN liflerini guanidin karbonat, etilendiamin ve demir klorür gibi kimyasal maddelerin sulu çözeltileri içerisinde bekletmiş ve ardından hava sirkülasyonlu bir fırın içerisinde stabilizasyonunu gerçekleştirmiştir. Ön kimyasal işlemin, karbonizasyon aşamasından önce PAN lifinin termal stabilizasyonu için gerekli zamanı azalttığını, yüksek karbonizasyon sıcaklıklarına dayanmak için gerekli olan halkalı yapının daha hızlı oluştuğunu belirtmişlerdir. Maghe ve ark., (2016) karbon lif üretiminde enerji tüketimini azaltmaya yönelik olarak yaptıkları çalışmada; PAN liflerini %7,5 konsantrasyondaki 1-butil-3-metilimidazolyum asetat gibi iyonik bir sıvının sulu çözeltisi içerisinde 30 saniyeden 24 saate kadar farklı sürelerde bekletmiş ve 180-238°C arasındaki sıcaklıklarda stabilize etmiştir. İyonik sıvıların etkisiyle stabilizasyon oranının arttığını ve nitril bağının şiddetinin daha hızlı azaldığını belirtmişlerdir. J. Huang ve ark., (2019) düşük maliyetli karbon lif üretimi için, PAN liflerini %1'lik guanidin hidroklorür ile modifiye etmiş ve ardından hava ortamında 220-270°C arasındaki sıcaklıklarda stabilize etmiştir. Stabilize olan liflerin karbonizasyonunu azot ortamında 1400°C'de gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre; guanidin hidroklorürün daha düşük sıcaklıklarda nitril gruplarının halkalaşma reaksiyonunu başlatabileceğini ve akrilik lifin termal stabilizasyonunu destekleyebileceğini göstermişlerdir. X. Sun ve ark., (2020) PAN liflerini hidroksilamin hidroklorür ve monoetanolamin ile ön işlemde geçirdikten sonra hava ortamında 170-250°C arasındaki sıcaklıklarda stabilize etmiştir. Yapılan ön işlemler ile termal kararlılığın geliştiğini ve LOI değerinin 40,1 olduğunu belirtmişlerdir. Kimyasal yöntemlerin kullanıldığı tüm çalışmalarda ortaya çıkan ortak sonuç, bu yöntemin termal stabilizasyon süresini azalttığı, halkalı yapı oluşumunu hızlandırdığı ve karbonizasyon sıcaklıkları için gerekli olan termal stabiliteyi sağladığı şeklindedir.

Fiziksel yöntemler; elektron ışınlama, gama ışınlama, ultraviyole ışınlama (UV) ve plazma oksidasyonu gibi radyasyona dayalı olarak gerçekleştirilen stabilizasyon yöntemleridir. Geleneksel stabilizasyon yönteminde PAN öncüsünün çapraz bağlanması termo-oksidatif reaksiyonlarla gerçekleşmektedir. Fiziksel yöntemler ise polimer endüstrisinde çapraz bağlanma reaksiyonlarını indüklemek için radyasyona dayalı türlerin kullanımını içermektedir. Zhao ve ark., (2016) stabilize PAN liflerinin çapraz bağlanması ve karbon liflerin mekanik özelliklerinin gama ışını ile ışınlanarak iyileştirilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada; PAN liflerini önce 190-270°C arasındaki sıcaklıklarda stabilize etmiş ve ardından gama ışını altında farklı dozlarda ışınlamışlardır. En son azot ortamında 400-1200°C

arasındaki sıcaklıklarda karbonize etmişlerdir. PAN liflerinin ilk olarak nispeten daha ılımlı bir sıcaklıkta termal olarak oksitlenmesi, daha sonra tamamen stabilize edilmek üzere gama ışını ile ışınlanmasının, ortaya çıkan karbon liflerin mekanik özelliklerini, yalnızca termal olarak stabilize edilmiş numunelere kıyasla arttırdığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak gama ışını ışınlama teknolojisi liflerin stabilitesini ve karbon liflerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için liflerin içinde çapraz bağlanmayı indükleyen etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Termal olarak stabilize edilmiş PAN lifinde radyal yapı heterojenliği, ortaya çıkan karbon liflerin mekanik özelliklerini sınırlayıcı bir faktör olarak kabul edilmektedir. Dang ve ark., (2018) termal stabilizasyon sırasında PAN liflerinde gama ışınlanmasının radyal yapı heterojenliğine etkilerini incelemek üzere yaptıkları çalışmada; düşük doz gama ışınli bir ön işlemin, termal stabilizasyondan sonra PAN liflerinin radyal yapısal heterojenliğini etkili bir şekilde azaltabileceğini göstermiştir. Düşük doz ışını radyasyonun tetiklediği PAN liflerde artan amorf bölgenin stabilizasyon sırasında kabuktan-çekirdeğe oksijen difüzyonunu kolaylaştırabileceğini ve bu durumda stabilize PAN liflerinde radyal yapısal homojenliğini arttıracığını belirtmiş olup, bu durumu Şekil 6'daki gibi desteklemişlerdir.

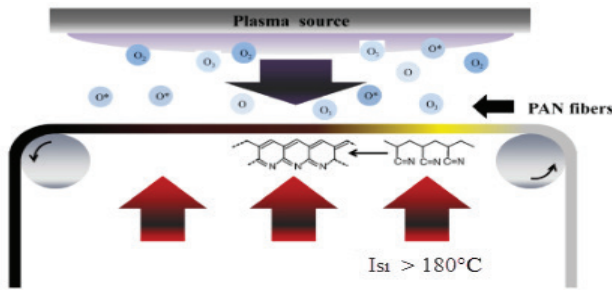


Şekil 6. PAN yapısının gama ışını ışınlanmasından sonra yarı kristal yapıdan amorf yapıya geçişi ve oksijen difüzyonu üzerindeki etkisi (Dang ve ark., 2018)

Jo ve ark., (2019) UV ışınlanmanın tekstil sınıfı PAN liflerinin stabilizasyonuna etkilerini incelemek üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada; 75°C'de 20 dakika kadar kısa bir süre boyunca uygulanan radyasyonun, tekstil sınıfı PAN liflerinde, stabilizasyonu hızlandıran radikaller ürettiği ve bu durumun, işlem süresinin önemli ölçüde azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak; karbon lif üretim prosesine UV ışınlanmasının dahil edilmesinin, stabilizasyon sürecini etkili bir şekilde ilerleterek süreyi kısaltabileceğini ve tekstile dayalı düşük maliyetli karbon lifler üretilebi-

leceğini göstermişlerdir. Son ve ark., (2019) PAN liflerinin UV ışınması ile stabilizasyonun hızlandırılması başlıklı çalışmada, PAN liflerini herhangi bir foto-başlatıcı olmaksızın UV ışını ile muamele ederek PAN lifinin yapısında meydana gelen değişiklikleri araştırmışlardır. UV ışınlamasının, PAN liflerindeki C-H bağı kırarak serbest radikaller oluşturduğunu ve bu durumda halkalaşma sıcaklığını ve aktivasyon enerjisini düşürdüğünü göstermişlerdir. Bununla birlikte, UV ışınlaması ve ısıl işlemin, stabilizasyon süresini azalttığını belirtmişlerdir. S. Park ve ark., (2016) geleneksel ısıl işlem süresini azaltmak için elektron ışını ile ışınlanmış PAN liflerinin stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada; termal stabilizasyondan önce PAN liflerine bir elektron ışını uygulamışlar ve ardından 230°C'de 30 dakika gibi kısa bir sürede ısıl işlem uygulayarak stabilize etmişlerdir. Stabilize olan PAN liflerinin karbonizasyonunu ise 1200°C sıcaklıkta gerçekleştirerek 2,3 GPa gerilme mukavemetine ve 216 GPa elastik modülüne sahip karbon lifler üretmişlerdir. Elektron ışını ışınlamasının, geleneksel termal stabilizasyon işlemine kıyasla termal stabilizasyon işlemini dörtte bir oranında kısalttığını belirtmişlerdir.

Geleneksel termal stabilizasyon işlemiyle, çok filamentli PAN lifleri stabilize edildiğinde yeterli stabilizasyonun sağlanabilmesi birkaç saatten fazla sürmektedir. S-Y. Kim ve ark., (2015) Şekil 7'de gösterildiği gibi, yaptıkları çalışmada; sadece 30 dakika gibi kısa bir sürede atmosferik basınç altında plazma teknolojisi ve ısıtma işlemiyle 24000 filamentli bir PAN lifini stabilize etmişlerdir. Plazma stabilizasyonunu, atmosferik basınçlı bir plazma kaynağı ve bir ısıtıcı kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Stabilize PAN liflerinin karbonizasyonunu ise, azot ortamında 1200°C'de yapmışlardır. Plazma bazlı stabilizasyon işleminin sadece işlem süresini kısaltmak için değil, aynı zamanda büyük tow karbon liflerinin sürekli stabilizasyonunu sağlamak için potansiyel bir çözüm sağladığını belirtmişlerdir.



Şekil 7. Stabilizasyon işlemi için plazma sisteminin şematik diyagramı (S-Y. Kim ve ark., 2015)

Shin ve ark., (2015) yaptıkları derleme çalışmada; radyasyon esaslı stabilizasyonun, PAN'ın C≡N bağlarını geleneksel ısıl işleminden daha basit

ve daha hızlı bir şekilde C=N bağlarına dönüştürülebileceğini belirtmiştir. Ayrıca, elektron ışınlaması ve plazma ile oksitlenmiş PAN liflerinden üretilen karbon liflerin, termal stabilizasyon ile elde edilen karbon liflere göre iyileştirilmiş bir gerilme mukavemeti sergilediğini göstermişlerdir.

5. SONUÇLAR

Yüksek mekanik özellik ve düşük yoğunluk gibi çok önemli özellikler sayesinde yüksek performanslı lifler arasına giren ve günümüz endüstrisinde birçok farklı alanda ihtiyaç duyulan bir malzeme haline gelen karbon liflerin, üretimlerini kısıtlayan en önemli faktör yüksek maliyetleridir. PAN esaslı karbon lif üretiminde bu maliyetlerin büyük bir kısmını hammadde ve üretimde en önemli aşama olarak gösterilen termal stabilizasyon aşaması oluşturmaktadır. Hammadde kaynaklı maliyetleri azaltmak için birçok madde karbon lif üretiminde alternatif hammadde olarak değerlendirilmiş olmasına rağmen, zift ve rayon da dâhil olmak üzere hiçbir madde PAN esaslı karbon liflerin sergilediği üstün özelliklere sahip olamamıştır. Üretim maliyetlerini azaltmanın bir diğer yolu ise, proses parametrelerini optimize etmektir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında parametrelerin optimize edilmesi hem karbon lif mekanik özelliklerini geliştirmekte hem de az da olsa maliyetleri düşürmektedir. Ancak, karbon lif özellikleri iyileşmesine rağmen azalan maliyetler yeterli seviyede görülmemektedir. Bu nedenle, çok fazla enerji tüketiminin olduğu geleneksel stabilizasyon işlemleri yerine alternatif stabilizasyon yöntemleri geliştirilmiştir.

Hem kimyasal yöntemler hem de radyasyona dayalı fiziksel yöntemlerin PAN liflerinin stabilizasyon süreçlerinin geliştirilmesine katkı sağladığı çok açıktır. Kimyasal yöntemlerin kullanıldığı üretim süreçlerinde çevre kirliliği gibi etkenler göz önünde bulundurulduğunda, fiziksel yöntemlerin kullanımı çok daha fazla tercih edilmektedir. Ayrıca fiziksel yöntemler arasında da, UV ışınlarının diğer radyasyon türleri içinde daha az zararlı olarak görülmesi, UV radyasyonlu stabilizasyonu diğer yöntemler arasında ön plana çıkarmaktadır. Alternatif stabilizasyon yöntemleri sayesinde karbon lif üretim süresi önemli ölçüde azalmakta ve bu durum stabilizasyon kaynaklı yüksek karbon lif fiyatlarının düşmesini sağlamaktadır. Ayrıca, alternatif stabilizasyon yöntemleriyle elde edilen PAN esaslı karbon liflerin mekanik özelliklerinin, belki yüksek performans amaçlı ürünler için olmasa da, genel kullanım amaçlı ürünlerin üretiminde kullanılabilir seviyede olduğu rahatlıkla söylenebilir. Diğer yandan, alternatif stabilizasyon yöntemlerinin iyileştirilmesi ve ticarileşme açısından endüstriye entegre edilmesi için daha fazla çalışma yapılması da bir ihtiyaç olarak görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; Tuba DEMİREL adına YÖK 100/2000 kapsamında Mikro ve Nanoteknoloji Malzemeleri üzerine yapılan çalışmalar için doktora bursu ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Baker, D.A., Rials, T.G., (2013), Recent advances in low-cost carbon fiber manufacture from lignin, *J. Appl. Polym. Sci.*, 130(2), 713–728.
- Bang, Y.H., Lee, S., Cho, H.H., (1998), Effect of methyl acrylate composition on the microstructure changes of high molecular weight polyacrylonitrile for heat treatment, *Journal of Applied Polymer Science*, 68(13), 2205–2213.
- Barton, et al., (2015), Two-step sulfonation process for the conversion of polymer fibers to carbon fibers, U.S. Patent, 2015/0152574 A1.
- Bhatt, P., Goel, A., (2017), Carbon fibres: Production, properties and potential use, *Material Science Research India*, 14(1), 52-57.
- Catta Preta, I.F., Sakata, S.K., Garcia, G., Zimmermann, J.P., Galembeck, F., Giovedi, C., (2007), Thermal behavior of polyacrylonitrile polymers synthesized under different conditions and comonomer compositions, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 87, 657-659.
- Choi, D., Kil, H.S., Lee, S., (2019), Fabrication of low-cost carbon fibers using economical precursors and advanced processing technologies, *Carbon*, 142, 610–649.
- Clarke, A.J., Bailey, J.E., (1973), Oxidation of acrylic fibres for carbon fibre formation, *Nature*, 243, 146-154.
- Coleman, M.M., Sivy, G.T., (1981), Fourier transform IR studies of the degradation of polyacrylonitrile copolymers-I: Introduction and comparative rates of the degradation of three copolymers below 200°C and under reduced pressure, *Carbon*, 19, 123–126.
- Dalton, S., Heatley, F., Budd, P.M., (1999), Thermal stabilization of polyacrylonitrile fibres, *Polymer*, 40, 5531-5543.
- Damodaran, S., Desai, P., Abhiraman, A.S., (1990), Chemical and physical aspects of the formation of carbon fibres from PAN-based precursors, *The Journal of The Textile Institute*, 81(4), 384–420.
- Dang, W., Liu, J., Huang, X., Liang, J., Wang, C., Miao, P., An, Y., Wang X., (2018), Effects of γ -Ray irradiation on the radial structure heterogeneity in polyacrylonitrile fibers during thermal stabilization, *Polymers*, 10(9), 943.
- Dang, W., Liu, J., Wang, X., Yan, K., Zhang, A., Yang, J., Chen, L., Liang, J., (2020), Structural transformation of polyacrylonitrile (PAN) fibers during rapid thermal pretreatment in nitrogen atmosphere, *Polymers*, 12(1), 63.
- Donnet, J.B., Bansal, R.C., (1984), *Carbon fibers*, M. Dekker, New York, A.B.D.
- Donnet, J.B., Bansal, R.C., (1990), *Carbon fibers*, Vol. 2nd ed., Marcel Dekker, New York, A.B.D.
- Edison, T.A., (1880), Electric lamp, U.S. Patent, 223898.

- Fakhrhoseini, S.M., Khayyam, H., Naebe, M., (2018), Chemically enhanced wet-spinning process to accelerate thermal stabilization of polyacrylonitrile fibers, *Macromolecular Materials and Engineering*, 303(8), 1700557.
- Farsani, R.E., Shokuhfar, A., Sedghi, A., (2007), Conversion of modified commercial polyacrylonitrile fibers to carbon fibers, *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 11, International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 1(11), 116–119.
- Fitzer, E., (1989), Pan-based carbon-fibers present state and trend of the technology from the viewpoint of possibilities and limits to influence and to control the fiber properties by the process parameters, *Carbon*, 27(5), 621-645.
- Frank, E., Stuedle, L.M., Ingildeev, D., Spörl, J.M., Buchmeiser, M.R., (2014), Carbon fibers: precursor systems, processing, structure, and properties, *Angew Chem. Int. Ed.*, 53, 5262–5298.
- Frushour, B.G., Knorr, R.S. *Acrylic Fibers*; (2006), *Handbook of fiber chemistry, Third Edition*, CRC Press, New York, A.B.D.
- Fu, Z., Liu, B., Deng, Y., Ma, J., Cao, C., Wang, J., Ao, Y., Zhang, H., (2016), The Suitable itaconic acid content in polyacrylonitrile copolymers used for PAN-based carbon fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 133(38), 43919-29.
- Gill, A.S., Visotsky, D., Mears, L., Summers, J.D., (2017), Cost estimation model for polyacrylonitrile-based carbon fiber manufacturing process, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(4), 041011.
- Golkarnarenji, G., Naebe, M., Badii, K., Milani, A., Jazar, R., Khayyam, H., (2018), Production of low cost carbon-fiber through energy optimization of stabilization process, *Materials*, 11(3), 385.
- Gupta, A.K., Paliwal, D.K., Bajaj, P., (1996), Effect of the nature and mole fraction of acidic comonomer on the stabilization of polyacrylonitrile, *Journal of Applied Polymer Science*, 59(12), 1819–1826.
- Hameed, N., Sharp, J., Nunna, S., Creighton, C., Magniez, K., Jyotishkumar, P., Salim, N.V., Fox, B., (2016), Structural transformation of polyacrylonitrile fibers during stabilization and low temperature carbonization, *Polymer Degradation and Stability*, 128, 39–45.
- Hao, J., Liu, Y., Lu, C., (2018), Effect of acrylonitrile sequence distribution on the thermal stabilization reactions and carbon yields of poly(acrylonitrile-co-methyl acrylate), *Polymer Degradation and Stability*, 147, 89–96.
- Hou, Y., Sun, T., Wang, H., Wu, D., (2008), Effect of heating rate on the chemical reaction during stabilization of polyacrylonitrile fibers, *Textile Research Journal*, 78(9), 806–811.

- Huang, J., Ouyang, Q., Li, M., Heng, F., Ma, H., Chen, Y., (2019), Thermal behavior and thermal stabilization of guanidine hydrochloride-modified acrylic fiber for preparation of low-cost carbon fiber, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136, 2195–2203.
- Huang, X., (2009), Fabrication and properties of carbon fibers, *Materials*, 2(4), 2369-2403.
- Jie, L., Wangxi, Z., (2005), Structural changes during the thermal stabilization of modified and original polyacrylonitrile precursors, *Journal of Applied Polymer Science*, 97(5), 2047–2053.
- Jo, A.Y., Yoo, S.H., Chung, Y-S., Lee, S., (2019), Effects of ultraviolet irradiation on stabilization of textile-grade polyacrylonitrile fibers without photo-initiator for preparing carbon fibers, *Carbon*, 144, 440-448.
- Kaburagi, M., Bin, Y., Zhu, D., Xu, C., Matsuo, M., (2003), Small angle X-ray scattering from voids within fibers during the stabilization and carbonization stages, *Carbon*, 41(5), 915–926.
- Kaneko, M., Sato, H., (2005), Sulfonation of poly(propylene) films with fuming sulfuric acid, *Macromolecular Chemistry and Physics*, 206(4), 456–463.
- Karacan, İ., Tunçel, K.Ş., (2013), Thermal stabilization of poly(hexamethylene adipamide) fibers in the presence of ferric chloride prior to carbonization, *Polymer Degradation and Stability*, 98(9), 1869-1881.
- Karacan, İ., Tunçel, K.Ş., (2013), An assessment of the impact of cupric ion complexation on thermal stabilization of polyamide 66 as carbon fiber precursor, *Recent Research Advances in Applied Polymer Science*, vol.5, Chapter 1 (pp.1-35), Kerala: Research Signpost.
- Karacan, İ., Benli, H., (2011), The effect of sulfonation treatment on the structure and properties of isotactic polypropylene fibers prior to the carbonization stage, *Journal of Applied Polymer Science*, 123(6), 3375–3389.
- Karacan, İ., Erdoğan, G., (2012), Ferric chloride assisted thermal stabilization of polyacrylonitrile precursor fibers prior to carbonization, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 22(5), 1016–1027.
- Karacan, İ., Erdoğan, G., (2011), An investigation on structure characterization of thermally stabilized polyacrylonitrile precursor fibers pretreated with guanidine carbonate prior to carbonization, *Polymer Engineering and Science*, 52(5), 937–952.
- Karacan, İ., Erdoğan, G., (2011), The effect of ethylenediamine pretreatment on the molecular structure of thermally stabilized polyacrylonitrile fibers before carbonization, *Polymer Engineering and Science*, 52(3), 467–480.
- Karacan, İ., Erdoğan, G., (2012), The role of thermal stabilization on the structure and mechanical properties of polyacrylonitrile precursor fibers, *Fibers and Polymers*, 13(7), 855-863.

- Kaur, J., Millington, K., Smith, S., (2016), Producing high-quality precursor polymer and fibers to achieve theoretical strength in carbon fibers: A review, *Journal of Applied Polymer Science*, 133(38), 43963.
- Khayyam, H., Jazar, R.N., Nunna, S., Golkarnarenji, G., Badii, K., Fakhrhoseini, S.M., Kumar, S., Naebe, M., (2020), PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling, *Progress in Materials Science*, 107, 100575.
- Khayyam, H., Naebe, M., Zabihi, O., Zamani, R., Atkiss, S., Fox, B., (2015), dynamic prediction models and optimization of polyacrylonitrile (pan) stabilization processes for production of carbon fiber, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(4), 887–896.
- Kim, K-W., Lee, H-m., Kim, B.S., Hwang, S-H., Kwac, L-K., An, K-H, Kim, B-J., (2015), Preparation and thermal properties of polyethylene-based carbonized fibers, *Carbon Letters*, 16(1), 62-66.
- Kim, S-Y., Lee, S., Park, S., Jo, S.M., Lee, H-S., Joh, H-I, (2015), Continuous and rapid stabilization of polyacrylonitrile fiber bundles assisted by atmospheric pressure plasma for fabricating large-tow carbon fibers, *Carbon*, 94, 412–416.
- Ko, K.S., Park, C.W., Yoon, S.H., Oh, S.M., (2001), preparation of kevlar-derived carbon fibers and their anodic performances in li secondary batteries, *Carbon*, 39, 1619-1625.
- Ko, T-H., Taipei (TW), (2010), Method for making carbon fabric and product thereof, U.S. Patent, 7,670,970 B2.
- Kong, L., Liu, H., Cao, W., Xu, L., (2014), PAN fiber diameter effect on the structure of PAN-based carbon fibers, *Fibers and Polymers*, 15(12), 2480-2488.
- Krishnan, G.S., Thomas, P., Naveen, S., Murali, N., (2018), Molecular and thermal studies of carbon fiber precursor polymers with low thermal-oxidative stabilization characteristics, *Journal of Applied Polymer Science*, 135(25), 46381.
- Laffont, L., Monthieux, M., Serin, V., Mathur, R.B., Guimon, C., Guimon, M.F., (2004), An EELS study of the structural and chemical transformation of PAN polymer to solid carbon, *Carbon*, 42(12-13), 2485–2494.
- Lei, D., Devarayan, K., Li, X-D., Choi, W-K., Seo, M-K., Kim, B-S., (2014), Effects of comonomer with carboxylic group on stabilization of high molecular weight polyacrylonitrile nanofibrous copolymers, *Carbon Letters*, 15(4), 290-294.
- Li, C., Zhu, H., Salim, N.V., Fox, B.L., Hameed, N., (2016), Preparation of microporous carbon materials via in-depth sulfonation and stabilization of polyethylene, *Polymer Degradation and Stability*, 134, 272–283.

- Liu, H., Luo, Q., Zhang, S., Shi, L., Yang, J., Liu, R., Wang, M., Zhu, C., Xu, J., (2018), New comonomer for polyacrylonitrile-based carbon fiber: Density functional theory study and experimental analysis, *Polymer*, 153, 369–377.
- Liu, H., Zhang, S., Yang, J., Ji, M., Yu, J., Wang, M., Chai, X., Yang, B., Zhu, C., Xu, J., (2019), Preparation, stabilization and carbonization of a novel polyacrylonitrile-based carbon fiber precursor, *Polymers*, 11(7), 1150.
- Liu, J., Xia, S., Shen, Z., Xu, L., Zhang, L., Peng, J., (2018), Study on the oxidative stabilization of polyacrylonitrile fibers by microwave heating, *Polym. Degrad. Stab.*, 150, 86–91.
- Maghe, M., Creighton, C., Henderson, L.C., Huson, M.G., Nunna, S., Atkiss, S., Byrne, N., Fox, B.L., (2016), Using ionic liquids to reduce energy consumption for carbon fibre production, *Journal of Materials Chemistry A*, 4(42), 16619–16626.
- Meinl, J., Schönfeld, K., Kirsten, M., Kittler, K., Michaelis, A., Cherif, C., (2017), Optimization of the temperature program to scale up the stabilization of polyacrylonitrile fibers, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 96, 37–45.
- Moskowitz, J.D., Jacobs, W., Tucker, A., Astrove, M., Harmon, B., (2020), Thermo-oxidative stabilization of polyacrylonitrile-based copolymers with guanidinium itaconate, *Polymer Degradation and Stability*, 178, 109198.
- Nakao, F., Uno, H., (1989), Surface treatment process for carbon fibers, U.S. Patent, 4,839,006.
- Naskar, A.K., Walker, R.A., Proulx, S., Edie, D.D., Ogale, A.A., (2005), UV assisted stabilization routes for carbon fiber precursors produced from melt-processible polyacrylonitrile terpolymer, *Carbon*, 43, 1065-1072.
- Ngoc, U.N.T., Hong, S.C., (2013), Structural evolution of poly(acrylonitrile-co-itaconic acid) during thermal oxidative stabilization for carbon materials, *Macromolecules*, 46, 5882–5889.
- Nunna, S., Naebe, M., Hameed, N., Fox, B.L., Creighton, C., (2017), Evolution of radial heterogeneity in polyacrylonitrile fibres during thermal stabilization: An overview, *Polymer Degradation and Stability*, 136, 20-30.
- Paiva, M., Kotasthane, P., Edie, D., Ogale, A., (2003), UV stabilization route for melt-processible PAN-based carbon fibers, *Carbon*, 41, 1399-1409.
- Park, S., Yoo, S.H., Kang, H.R., Jo, S.M., Joh, H-I., Lee, S., (2016), Comprehensive stabilization mechanism of electron-beam irradiated polyacrylonitrile fibers to shorten the conventional thermal treatment, *Scientific Reports*, 6(1), 27330.
- Park, S.J., (2015), *Carbon fibers*, Springer, New York, A.B.D.

- Qiao, W.M., Yoon, S.H., Korai, Y., Mochida, I., Inoue, S., Sakurai, T., Shimohara, T., (2004), Preparation of activated carbon fibers from polyvinyl chloride, *Carbon*, 42, 1327–1331.
- Qin, X., Lu, Y., Xiao, H., Song, Y., (2012), Improving stabilization degree of stabilized fibers by pretreating polyacrylonitrile precursor fibers in nitrogen, *Materials Letters*, 76, 162–164.
- Rahaman, M.S.A., Ismail, A.F., Mustafa, A.A, (2007), A review of heat treatment on polyacrylonitrile fiber, *Polym. Degrad. Stab.*, 92, 1421-1432.
- Rajalingam, P., Radhakrishnan, G., (1991), Polyacrylonitrile precursor for carbon fibers, *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 31(2-3), 301–310.
- Ribeiro, R.F., Pardini, L.C., Alves, N.P., Brito Júnior, C.A.R., (2015), Thermal stabilization study of polyacrylonitrile fiber obtained by extrusion, *Polimeros*, 25(6), 523–530.
- Salim, N.V., Blight, S., Creighton, C., Nunna, S., Atkiss, S., Razal, J.M., (2018), The role of tension and temperature for efficient carbonization of polyacrylonitrile fibers: Towards low cost carbon fibers, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(12), 4268–4276.
- Savage, G., (1993), *Carbon-carbon composites*, Vol. 1., Chapman & Hall, London, England.
- Sedghi, A., Farsani, R.E., Shokuhfar, A., (2008), The effect of commercial polyacrylonitrile fibers characterizations on the produced carbon fibers properties, *Journal of Materials Processing Technology*, 198, 60-67.
- SGL Carbon, <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/panox-oxidized-pan-fibers/>, Erişim tarihi, 10 Ocak 2021.
- Sha, Y., Liu, W., Li, Y., Cao, W., (2019), Formation mechanism of skin-core chemical structure within stabilized polyacrylonitrile monofilaments, *Nanoscale Research Letters*, 14, 93.
- Shin, H.K., Park, M., Kim, H-Y., Park, S-J., (2015), An overview of new oxidation methods for polyacrylonitrile-based carbon fibers, *Carbon Letters*, 16(1), 11-18.
- Son, S-Y., Jo, A.Y., Jung, G.Y., Chung, Y-S., Lee, S., (2019), Accelerating the stabilization of polyacrylonitrile fibers by UV irradiation, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 73, 47–51.
- Soulis, S., Konstantopoulos, G., Koumoulos, E., Charitidis, C., (2020), Impact of alternative stabilization strategies for the production of PAN-based carbon fibers with high performance, *Fibers*, 8(6), 33.
- Stuetz, D.E., (1969), U.S. Patent, 3449077.
- Sumitomo Chem. Co. Ltd., (1973), British Patent, 1406378.

- Sun, J., Wu, L., Wang, Q., (2005), Comparison about the structure and properties of PAN-based activated carbon hollow fibers pretreated with different compounds containing phosphorus, *Journal of Applied Polymer Science*, 96(2), 294–300.
- Sun, T., Hou, Y., Wang, H., (2009), Effect of atmospheres on stabilization of polyacrylonitrile fibers, *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 46(8), 807–815.
- Sun, X., Song, J., Zhang, J., Liu, J., Ke, H., Wei, Q., Cai, Y., (2020), Effects of chemical pre-treatment on structure and property of polyacrylonitrile based pre-oxidized fibers, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 1-8.
- Tajaddod, N., Li, H., Minus, M.L., (2018), Low-temperature graphitic formation promoted by confined interphase structures in polyacrylonitrile/carbon nanotube materials, *Polymer*, 137, 346–357.
- Tiyek, İ., Bozdoğan, F., (2008), Poliakrilonitril lif üretiminde koagülasyon banyo sıcaklığının lif iyapısına etkisinin geniş açılı X-ışınları difraksiyonu ile incelenmesi, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 18(2), 114-120.
- Torayca, <https://www.torayca.com/en/download/pdf/torayca.pdf>. Erişim tarihi, 5 Ocak 2021.
- Tsai, J-S., Lin, C-H, (1991), The effect of molecular weight on the cross section and properties of polyacrylonitrile precursor and resulting carbon fiber, *Journal of Applied Polymer Science*, 42(11), 3045–3050.
- Tsai, J-S., Lin, C-H., (1991), Effect of comonomer composition on the properties of polyacrylonitrile precursor and resulting carbon fiber, *Journal of Applied Polymer Science*, 43(4), 679–685.
- Tsai, J-S., Lin, C-H., (1991), The effect of the side chain of acrylate comonomers on the orientation, pore-size distribution, and properties of polyacrylonitrile precursor and resulting carbon fiber, *Journal of Applied Polymer Science*, 42(11), 3039–3044.
- Wang, J., Hu, L., Yang, C., Zhao, W., Lu, Y., (2016), Effects of oxygen content in the atmosphere on thermal oxidative stabilization of polyacrylonitrile fibers, *RSC Advances*, 6(77), 73404–73411.
- Wang, L., Lu, W., Zhang, L., Xue, L., Ryu, S.K., Jin, R.G., (2011), Effects of positive and negative stretching on the structure and properties of polyacrylonitrile fibers in the pre-oxidation process, *Carbon Letters*, 12(2), 107-111.
- Wu, S., Gao, A., Wang, Y., Xu, L., (2018), Modification of polyacrylonitrile stabilized fibers via post-thermal treatment in nitrogen prior to carbonization and its effect on the structure of carbon fibers, *Journal of Materials Science*, 53, 8627–8638.

- Xue, Y., Liu, J., Liang, J., (2013), Correlative study of critical reactions in polyacrylonitrile based carbon fiber precursors during thermal-oxidative stabilization, *Polym. Degrad. Stab.*, 98, 219–29.
- Yunker, J.M., Saito, T., Hunt, M.A., Naskar, A.K., Beste, A., (2013), Pyrolysis pathways of sulfonated polyethylene, an alternative carbon fiber precursor, *Journal of the American Chemical Society*, 135(16), 6130–6141.
- Yun, J-H., Kim, B-H., Yang, K.S., Bang, Y.H., Kim, S.R., Woo, H-G., (2009), Process optimization for preparing high performance PAN-based carbon fibers, *Bulletin-Korean Chemical Society*, 30(10), 2253-2258.
- Zhang, D., (1993), Carbon fibers from oriented polyethylene precursors, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 6(1), 38–48.
- Zhang, H., Quan, L., Gao, A., Tong, Y., Shi, F., Xu, L., (2020), Thermal analysis and crystal structure of poly(acrylonitrile-co-itaconic acid) copolymers synthesized in water, *Polymers*, 12(1), 221.
- Zhang, W., Li, M., (2005), DSC study on the polyacrylonitrile precursors for carbon fibers, *Journal of Materials Science and Technology*, 21, 581-584.
- Zhang, X., Kitao, T., Piga, D., Hongu, R., Bracco, S., Comotti, A., Sozzani, P., Uemura, T., (2020), Carbonization of single polyacrylonitrile chains in coordination nanospaces, *Chemical Science*, 11, 10844-10849.
- Zhao, W., Lu, Y., Wang, J., Chen, Q., Zhou, L., Jiang, J., Chen, L., (2016), Improving crosslinking of stabilized polyacrylonitrile fibers and mechanical properties of carbon fibers by irradiating with γ -ray, *Polymer Degradation and Stability*, 133, 16–26.
- Zoltek, <https://www.zoltek.com/products/ox/>, Erişim tarihi, 10 Ocak 2021.

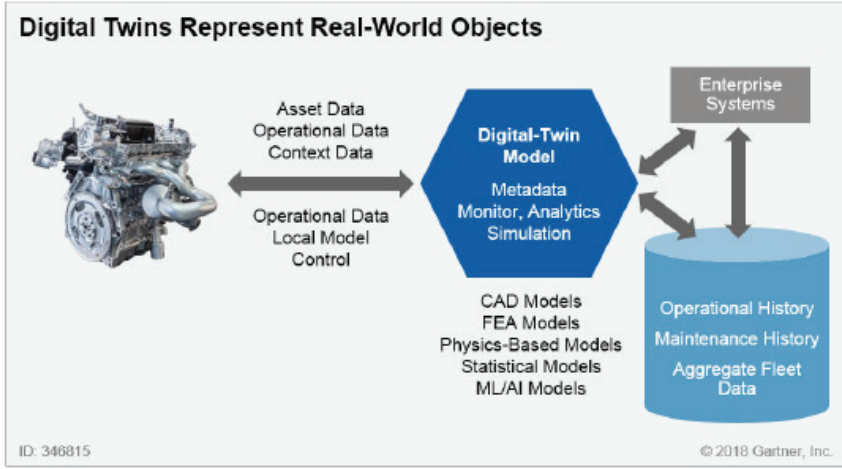
Bölüm 5

DİJİTAL İKİZ TEKNOLOJİNE GİRİŞ

Arif Furkan MENDİ

1.Dijital İkiz Teknolojisinin Tanımı

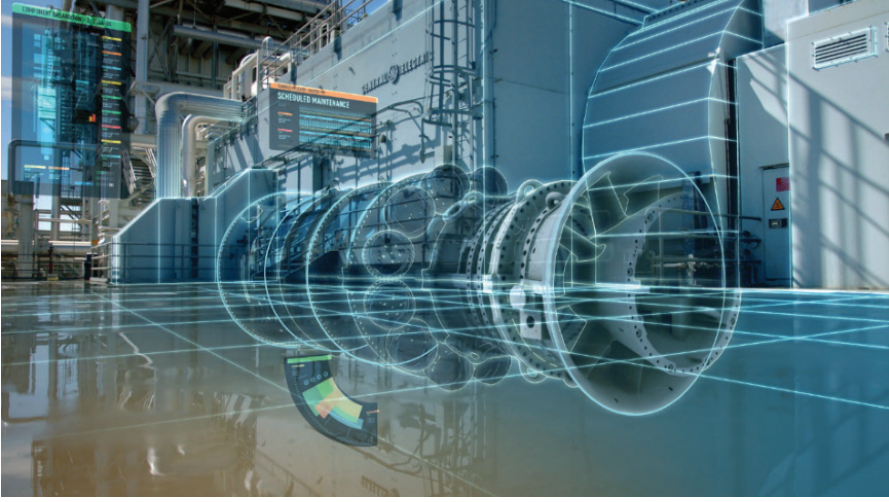
Sayıal ikiz, fiziksel bir nesnenin veya sistemin durumunu modellemeyi sağlayan bir kopyadır. Sayıal ikizler, herhangi bir fiziksel sistemin yapısını, bağlamını ve davranışını temsil eden veri ve istihbarat kombinasyonu ile geçmişi ve mevcut işlemi anlamayı ve geleceğe yönelik öngörüler yapmayı sağlayan bir arayüz sunarak fiziksel ve dijital dünya arasında bir köprü kurar (Şekil 1). Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve veri analitiği ile elde edilen bilgiler, nesnenin veya sistemin mevcut durumunun doğru bir şekilde tanımlanmasını ve anlaşılmasını sağlar. Sayıal ikiz, fiziksel dünyayı optimize etmek için kullanılabilir, operasyonel performansı ve iş süreçlerini önemli ölçüde geliştiren çok güçlü dijital nesnelere (Şekil 2).



Şekil 1. Dijital - Gerçek Dünya Nesnelere (Cearley, Burke, Searle, & Walker, 2017)

GE Global Research'ün çalışmalarını incelediğimizde dijital ikizle teknolojinin uygulama aşamalarının 3'e ayırabiliriz (Power Digital Solutions, 2016):

- Gör - Verilerin toplanması
- Düşün - Bir çok simülasyonun aynı anda yapılmasıyla en uygun durumun bulunması
- Yap - Bir çok opsiyon arasından en uygununun seçilmesi



Şekil 2. Fiziksel Nesnenin Dijital İkizi (Power Digital Solutions, 2016)

Örneğin havacılık ve uzay sanayii alanında, uçak üretimi ele alındığında, yeni modellerin üretim ve testlerini yapmak oldukça maliyetli işlemlerdir. Burada maliyet ve fayda analizinin dengelenmesi önemli bir faktördür. Modern uçak motorları her saniye terabaytlar düzeyinde veri üreten binlerce veya on binlerce sensöre sahiptir. Dijital ikizler, makine öğrenimi ve öngörücü modellerle birlikte üreticilerin ve pilotların yakıt tüketimini optimize etmesine, gerekli bakımların proaktif olmasına ve filoların maliyetleri yönetmesine yardımcı olacak öneriler sunmaktadır. Dijital ikizi olan bir uçakta, daha önce toplanan verilere dayanarak gelecekteki motor arızalarının tahmin gerçekleştirilebilmektedir. Uçağın ve motor sistemlerinin testlerinin gerçekleştirilmesi, yolcuların güvenliği için yapılacak kontroller ve olası tehlikelerin öngörülmesi açısından bu teknoloji önemli bir yere sahiptir. Geleneksel kontrol odaları da çeşitli tahmine dayalı analitiklere sahiptir, ancak dijital ikiz entegrasyonu, ortaya çıkan herhangi bir tehlikeyle başa çıkma verimliliğini artıracaktır. Kısacası, teknoloji mühendislerin sadece etkin bir şekilde çalışmalarını sağlayarak test maliyetlerini düşürmekle kalmayıp aynı zamanda sistemlere fiziksel olarak yakın olmadıklarında da bakım ve onarım imkânı sunmaktadır.

2. Dijital İkiz Teknolojisinin Bileşenleri

Ürün yaşam döngüsü değerlendirildiğinde dijital ikiz için üç bileşen gerekmektedir:

- Sistemin/ürünün gerçek ortamdaki hali
- Sistemin/ürünün sanal ortamdaki hali
- Gerçek ve sanal halleri birbirine bağlayan veri

Sistemin/ürünün gerçek ortamdaki hali ile sanal ortamdaki hali arasındaki bağlantıyı sağlamak içinse sensörlere ihtiyaç vardır. Fiziki sisteme/ürüne bağlanan sensörler vasıtasıyla sistemdeki canlı veriler toplanarak dijital ikizine iletilir. Verilere dayanarak sonuçları anlamak, simüle etmek ve tahmin etmek için makine öğrenmesi ve gelişmiş yapay zeka teknikleri kullanılır. Bu durumun sonucunda da sistem/ürün üzerinde gerçekleştirilecek durumlar öngörülmektedir. Elde edilen öngörüler, gelecekteki başarısızlıkların tahmini ve süreç iyileştirme konularında üreticilere yol haritalarını belirlemeleri konusunda yardımcı olmaktadır.

Gartner'ın dijital ikiz teknolojisini konu aldığı raporunu incelediğimizde; dijital ikiz için gerekli olan ve isteğe bağlı olabilen özellikleri Tablo 1'de listelenmektedir.

Tablo 1. *Dijital İkiz Teknolojisinin Gerekli ve İsteğe Bağlı Özellikleri (Yefim Natis , Simon Jacobson , Martin Reynolds , Alfonso Velosa , Benoit Lheureux , Marc Halpern , David Cearley, 2017)*

Dijital İkizin Gerekli Özellikleri	Dijital İkizlerin İsteğe Bağlı Özellikleri
Model: Bir sayıal ikiz, veri yapısı, meta veri, fiziksel özellikler ve kritik değişkenler dahil bir varlığın yapılandırılmış bir temsildir. Daha karmaşık, kompozit dijital ikizler daha basit atomik Dijital İkizlerden bir araya getirilebilir.	Analitik: Bir dijital ikiz, açıklayıcı, öngörücü ve kurallı analizler için formüller algoritmalar ve yapay zeka içerebilir.
Veri: Bir sayıal ikiz, kimlik, zaman dizileri gibi varlık verilerine sahiptir.	Simülasyon: Bir sayıal ikiz, gerçek dünyadaki nesnelerin davranışlarını ve onların etkileşimlerini modelleme yeteneğine sahip olabilir.
Fiziksel Kimlik: Bir sayıal ikiz, gerçek dünya nesnesiyle arasında bağlantıya sahiptir.	Kontrol: Bir sayıal ikiz gerçek dünyayı kontrol edebilir veya etkileyebilir.
İzleme Yeteneği: Bir sayıal ikiz gerçek dünyadaki nesnenin durumunu sorgulayabilir, gerçek zamanlı API'ler veya olay akışları aracılığıyla bildirimler alabilir.	

3. Teknolojinin Gelecek Öngörülleri

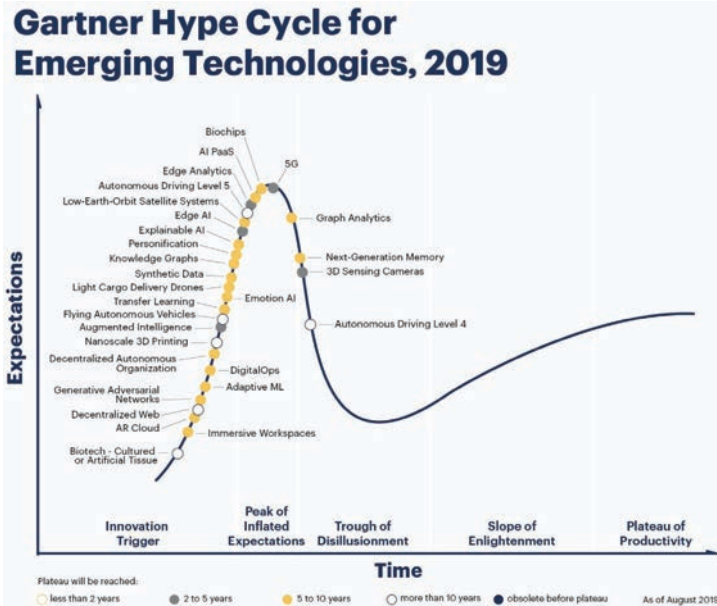
Sayıal ikiz teknolojisi giderek artan bir şekilde çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Sayıal ikizle ilgili teknolojilerin, standartların ve en iyi uygulamaların 2025 yılına kadar olgunlaşması beklenmektedir. Ayrıca dijital ikiz teknolojisi Endüstri 4.0 ile de direkt bağlantılıdır. Otomasyona geçen fabrikalar Endüstri 4.0 konsepti altında bir çok teknolojiyi birbiriyle entegre ederek kullanmakta ve yine aynı teknolojiler sayesinde robotların dijital ikizini oluşturarak fiziksel ve dijital dünya arasında bir köprü kurmaktadır. Bunun sonucunda kendi kararlarını verebilen akıllı robotlarla hızlı, esnek ve verimli üretim ortamlarının oluşturulduğu fabrikaların geleceği çok da uzak değildir.

Gartner'ın gelişmekte olan teknolojiler için hazırlamış olduğu raporda; yeni nesil teknolojinin beklentilere karşı zamanı eksenindeki durumunu ve tahminlemesini gösteren "Hypecycle" eğrisini incelediğimizde dijital ikiz teknolojinin "İnovasyon Tetikleyicisi" olduğu ve ilginin giderek arttığı görülmektedir (Kasey Panetta, 2017). Bu aşamada olgun ürünler mevcut değildir ve ticari uygulanabilirliği henüz kanıtlanmamıştır. Araştırmalar ve laboratuvar prototipleri bulunmaktadır. Girişimciler, eğer teknolojiden hızlı bir fayda sağlamayı istiyorlarsa, girişimlerini bu aşamada yapmaları gerekmektedir. Genel duruma bakıldığında dijital ikiz teknolojinin 5 ile 10 yıl arasında güçlü tedarikçiler ile piyasada yerini alacağı düşünülmektedir. Fakat o kadar uzun süre beklemeye gerek kalmadan birçok nesnenin 3 ile 5 yıl arasında dijital ikizinin oluşturulacağı öngörülmektedir.

Özellikle makine üretim içerikli sistemlerde dijital ikiz kavramı incelendiğinde, veri aktarımı genellikle nesnelere interneti ile gerçekleştirilmektedir. Makine üzerine yerleştirilen sensörler sayesinde makine davranışını analiz etme konusunda yardımcı olacak veri toplama işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu verilerin çeşitli yapay zeka tekniklerinin kullanılabileceği hale getirebilmek amacıyla saklama, ayıklama ve düzenleme işlemleri büyük veri analizi ve bulut teknolojilerinin kullanımıyla sağlanmaktadır.

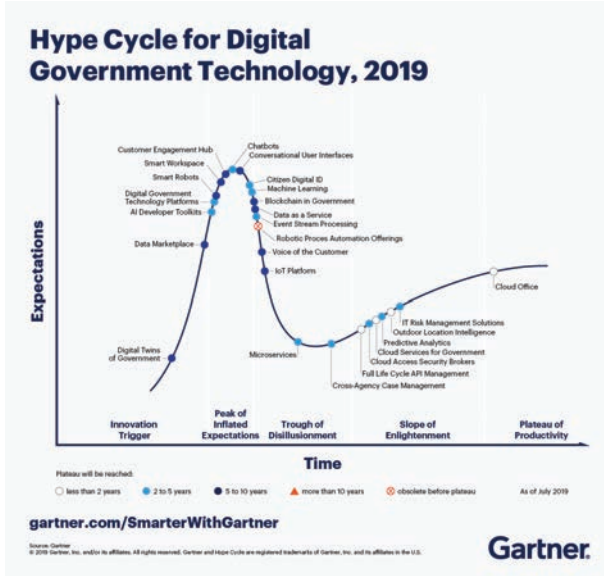
Nesnelerin interneti, büyük veri, görsel modelleme (artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik teknolojileri), makine öğrenmesi, yapay zeka ve bulut teknolojilerinin gelişmesi dijital ikiz konusunda yapılacak çalışmaların başarısına katkı sağlayacağı bilinmektedir.

Gartner 2019 "Hype Cycle for Emerging Technologies" raporu incelendiğinde dijital ikiz teknolojinin gelişiminde önemli yere sahip olan yapay zeka teknolojilerinde "inovasyonu tetikleyici" olma yönünde bir artış olduğu görülmektedir (Şekil 3) (Panetta, 2019).



Şekil 3: 2019 Gartner Yeni Nesil Teknolojiler Hypecycle (Panetta, 2019)

Gartner'ın 2019 yılında hazırlanmış olduğu "Hype Cycle for Government Technology" incelendiğinde dijital ikiz teknolojisinin "inovasyon tetikleyicisi" olduğu ve bu alandaki çalışmaların giderek artacağı görülmektedir (Şekil 4) (Moore, 2019). Özellikle akıllı şehir ve akıllı fabrikalar konusunda devletlerin çalışmalar yapmaya başlaması olması beklenen artış destekler niteliktedir.



Şekil 4. Devlet Çalışmaları için Teknolojiler Hypecycle (Moore, 2019)

Mevcut durumda ilgili market araştırmaları incelendiğinde elektronik ve elektrik/makine imalat sanayii, potansiyel dijital ikiz pazarının en büyük payına sahiptir. Pazarın büyümesi, endüstriyel ekipmanlar, bilgisayarlar, transformatörler, jeneratörler ve motorlar gibi ürünlerin tasarımı ve üretimi için dijitalleşme ihtiyacından ve satış sonrası hizmetlere duyulan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Dijital ikiz teknolojisinin benimsenmesi, bu endüstriler için ürün geliştirme süresini ve maliyetini önemli ölçüde azaltacaktır. Ayrıca malzeme değişikliği, süreç iyileştirme, verim artışı ve bakım tahmini gibi konularda detaylı bilgiye erkenden sahip olunabilecektir.

Sağlık alanında gerçekleştiren çalışmalar da günümüzde hız kazanmıştır. Bu alanda kalp, beyin gibi organların modellenmesi, hastalıkların erken tespit ve tedavisi konusunda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle sağlık alanı, dijital ikiz teknolojisinin uygulanabileceği en önemli potansiyel alan olarak görülmektedir.

IoT (nesnelerin interneti), büyük veri ve yapay zeka gibi yeni nesil teknolojiler kullanılarak oluşturulan çözümler, hastalara geleneksel yöntemlerle elde edilemeyecek hızlı, kaliteli ve güvenilir tedavi seçenekleri sunmaktadır. Üretilen çözümlerin çeşitlenmesi ile birlikte sağlık pazarının market büyüklüğü de gittikçe artmaktadır. Bu büyümede özellikle IoT teknolojisinin yeri gittikçe artmakta, sağlık pazarında ciddi bir konuma gelmektedir. Küresel pazar büyüklüklerini araştıran MarketsandMarkets'in sağlık pazarı incelemesinde, 2015 yılında 32.4 milyar dolar büyüklüğündeki küresel IoT sağlık pazarının %38'lik bir büyüme ile 2020 yılı sonunda 163.2 milyar dolar seviyesine ulaşması beklendiği vurgulanmaktadır (MarketsandMarkets, 2020). Bu veri, sağlık pazarı büyüklüğünün nasıl bir ivme ile büyüdüğünü göstermekte, IoT ile birlikte kullanılan teknolojilerin önemini ortaya koymaktadır.

Sağlık alanında dijital ikiz teknolojisinin kullanımının öngörüldüğü en radikal senaryo, insan vücudunun dijital ikizinin oluşturulmasıdır. Burada, mevcut herhangi bir mühendislik ürününden çok daha farklı ve zorlu bir süreç mevcut. IoT sensörler aracılığıyla herhangi bir ürün veya sistem üzerinden veri temini, insan üzerinden elde edilecek olandan daha zorludur. İnsan üzerinden elde edilecek veriler, genellikle kan testleri ve taramalar gibi yollar ile elde edilceğinden nispeten daha pahalı ve zaman alıcı olduğu söylenebilir.

İnsan vücudunun yeni nesil teknolojiler kullanılarak modellenmesi üzerine yapılan çalışmalar neticesinde, dijital hasta kavramı karşımıza çıkmaktadır. Dijital hasta, tıbbi kararları desteklemek için hastaya özel yapılan modellemelerdir. İlk olarak 2013 yılında avrupa komisyonu tarafından Discipulus ARGE projesi ile gündeme girmiştir. Proje ile dijital

hasta paradigmasını gerçekleştirmeye yönelik yol haritasının belirlenmesi amaçlanmıştır. İngiltere, Almanya, İspanya gibi birçok ülkenin önemli araştırma üniversitelerinin katıldığı çalışma neticesinde bir dijital hasta yol haritası belirlenmiş ve rapor hazırlanmıştır (Diaz, Viceconti, Stroetmann, & Kalra, 2013). Bu raporda üç temel başlık altında ihtiyaçlar ortaya konmuştur:

- Dijital hastanın oluşturulmasında aşılması gereken zorlu bir süreç bulunduğu; biyomedikal, matematik, biyomühendislik ve bilgisayar bilim dallarının entegre ve disiplinler arası uygulamalı çalışmalarına ihtiyaç olduğu,
- Dijital ikiz teknolojisinin uygulandığı tüm alanlardan olduğu gibi, burada da dijital hasta kavramı için en önemli unsurlardan birinin veri olduğu; doğru ve gerçekçi analizler ve sonuçlar için daha çok veriye ihtiyaç duyulduğu,
- Dijital hasta kavramının tam otonom olarak kurgulanması gerektiği, fakat uygulamaya geçilebilmesi noktasında iki önemli hususun olduğu belirtilmiştir. Birincisi insanın karmaşık yapısı gereği dijital ikizini oluşturma süreçleri için alanında deneyimli kişilere ihtiyaç duyulmasıdır. İkincisi ise, karar alma açısından önem arz eden toplanan verilerin eksiksiz ve analiz için uygun hale getirilmiş olmasıdır.

Dijital hasta kavramı için modelleme ve simülasyon ihtiyacı birleştirildiğinde karşımıza dijital ikiz kavramı çıkmaktadır. Discipulus projesi ile belirlenen tüm bu ihtiyaçların dijital ikiz teknolojisi ile karşılanabileceği rahatlıkla söylenebilir.

Sağlık teknolojilerinin yanında, ilaç sektörü de yine dijital ikiz teknolojisinin kullanılabileceği önemli bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Küresel bazda milyonlarca hasta; metabolizmaları ve yaşam verileri farklı olmasına rağmen aynı ilaçlardan aynı sonucu alma umuduyla tedavi görmektedir. Bunların pek çoğunun aynı derecede olumlu sonuç alamadığı, hatta ölüm ile sonlanan durumlar olduğu da görülmektedir. 2020 yılında avrupada yapılan araştırma neticesinde her yıl 200.000'e yakın insanın, ilaç reaksiyonlarının olumsuz sonuçlarından dolayı hayatını kaybettiği tespit edilmiştir ("Digital Twins for Better Health," 2020). Bu olumsuz tabloya karşı çözüm, kişiselleştirilmiş ilaçlardır. Bu alanda yapılan çalışmaların biri 2011 yılında Alacris Theranostics şirketi tarafından gerçekleştirilmiş, insan DNA'larından elde edilen farklı veriler ile dijital ikizinin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu öncü çalışma ile insan vücudundaki tümörü tespit edip tedavi edebilmek için elde edilen verilerle kişiyi simüle edip farklı senaryolar geliştirerek denemeler yapılmıştır. Şu ana kadar kişiye özel çalışmalar yerine hasta gruplarıyla çalışmışlar gerçekleştirilebilmiştir. Bir sonraki aşamada ise bireysel uygulamalar hedeflenmektedir. Geliştirilen

dijital ikiz modelleri ile hastalıkların oluşmadan yok edilmesi ve sağlık sisteminde herhangi bir bozulma yaşanmadan onarımın tamamlanması hedeflenmektedir.

Kişiselleştirilmiş dijital ikiz sağlık uygulamaları konusundaki bir diğer örnek Dassault Systèmes ile ABD Gıda ve İlaç Dairesi arasında 2014 yılında gerçekleştirilen “Yaşayan Kalp” projesidir. Proje ile ilk defa bir organın tamamının simüle edilmesi, ilaç etkileşimlerini görebilmek için kullanılmıştır (Systems, 2017). Proje kapsamında oluşturulan kalp dijital ikizinin oluşturulması süresince eğitimciler, kardiyovasküler alanındaki araştırmacılar, tıbbi cihaz geliştiricileri, klinisyenler ve diğer düzenleyici kurumlar ile birlikte çalışılmıştır. İnsan kalbinin dijital ikizinin oluşturulması sayesinde doktorlar, kalp dokusundaki hareketlilikten dolayı tespti edemediklerini görebilme ve kalpteki karmaşık yapıyı birebir aynı organ modeli üzerinden denemeler yaparak çalışma fırsatı elde etmiştir. Kişiselleştirilmiş veriler sayesinde, hasta özelinde tedavi sürecinin yürütülebilmesi ve gelecekteki tıbbi tedaviler için umut verici araştırmaların gerçekleştirilmesinin yolu açılmıştır. Klinik deneme maliyetlerinin azaldığı, daha etkili ve yeni yöntemlerin uygulanabildiği bir model elde edilmiştir. Diğer taraftan, bu dijital ikiz modelleme yönteminin kullanımının yaygınlaşması ile birlikte laboratuvar hayvanlarının kullanımının da azalacağı öngörülmektedir.

Yapılan ve yapılması planlanan çalışmalarda, genel olarak insan sağlığının korunması, erken teşhis ve tedavi süreçlerinin gerçekleştirilmesi ve ilaç üretim sanayiindeki süreçlerin dijital ikiz teknolojisiyle hızlandırılması amaçlanmaktadır. Dijital hasta teknolojilerinin aktif kullanımıyla hastalar başka bir yerdeyken bulut üzerinden dijital ikizinin hastanede sağlık profesyonellerince muayenesi yapılabilecek ve tanısı konulabilecektir. Bu sayede hastanelerde ayakta tedavi hizmetleri ve maliyetleri azaltılacak ve yaşam kalitesi yükseltilebilecektir. İlaç endüstrisinde ise dijital ikiz teknolojisi ile üretim bandı süreçlerinin yanı sıra ilaç maddelerinin test edilmesi konusunda zaman tasarrufu da sağlanabilecektir.

4. Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS)

4.1. Güncel THS

Yeni nesil teknolojilerden biri olan dijital ikiz teknoloji hazırlık seviyesinin, sistemin karmaşıklığına bağlı olarak 1 ile 5 arasında olduğu değerlendirilmektedir.

4.2.15-20 Yıllık Zaman Dilimi içinde THS

Önümüzdeki 15-20 yıllık zaman diliminde uygulama sayılarının artacağı, bununla birlikte teknolojinin de olgunluğa ulaşmayı başlayacağı ve teknoloji hazırlık seviyesinin 7-9 bandına ulaşacağı öngörülmektedir.

5. Teknolojinin Getirdiği Dezavantajlar

Dijital ikiz teknolojisinin sağladığı faydaların yanında dezavantaj oluşturabileceği durumlarda bulunmaktadır.

- **Maliyet:** Gelişmiş, yüksek kaliteli dijital ikiz modellerinin oluşturulma maliyeti, kurulacak sistemin mahiyetine bağlı olarak (sensör, cihaz vb.), sağlayacağı iş avantajlarını aşabilmektedir.
- **Karmaşıklık:** Dijital ikizler geleneksel yollarla daha iyi uygulanabilecek bir sürece gereksiz karmaşıklık katabilmektedir. Bunun olmaması için ihtiyaç ve durum analizinin doğru yapılması, sistemin bu analize göre tasarlanması büyük önem taşımaktadır.
- **Entegrasyon:** Şu anda, heterojen bir varlık kümesine karşı kullanılmak üzere dijital ikizlerin uygulanması için tek tip bir tasarım yaklaşımı bulunmamaktadır.
- **Güvenlik:** Dijital ikizler, korsanların kurumsal nesnelere zarar vermesini ve fiziksel bir nesnenin kontrol sistemine ulaşmasına yol açabilmektedir. Dijital ikiz oluşturulurken, bu zorlukları hafifletmek için güvenlik ve risk değerlendirmesi yapılmalıdır.
- **Perspektif:** Bir kuruluşun farklı bölümleri (hatta paydaşlar), dijital ikiz tasarımı, işlevselliği ve kullanımı konusunda farklı perspektiflere sahip olabilmektedir. Bu, dijital ikizlerin oluşturulmasının yanı sıra değerli verilerin tanımlanması konusunda da zorluklara yol açabilmektedir.
- **Gizlilik:** Dijital ikiz oluşturulurken, gizlilikle ilgili nasıl bir önlem alınması gerektiği henüz belli değildir. Bu durum sürecin işleyişi konusunda anlaşmazlıklara yol açabilmektedir.

6. Dünya'da Dijital İkiz

Dijital ikiz teknolojisinin sağlamış olduğu imkânların toplumlar ve özellikle de üreticiler tarafından öğreniminin yaygınlaşması sonucu bu teknolojinin kullanımı küresel ölçekte artış göstererek imalat endüstrisi, havacılık ve uzay sanayii ve akıllı şehir vb. gibi birçok alanlarda çalışmalar gerçekleştirilmeye başlanmıştır.

Özellikle hata payının en aza indirgenmesi ve geleceğe yönelik tahminlerin kritik değer taşıdığı alanlar olan havacılık ve uzay sanayi alanında çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu alanda, Industrial and Financial Systems (IFS) müşterisi olan savunma ve havacılık sanayii için test sistem ve bileşenleri üreten Test-Fuchs, yer destek varlıkları ve test ekipmanları için dijital ikiz yaklaşımı uygulamaktadır. Bu sayede teknolojinin sunmuş olduğu olanaklardan faydalanmaktadır (Manufacturing, 2020).

Akıllı şehir girişimlerinde de trafik sıkışıklığını iyileştirme, kentsel planlama ve çok daha fazlasını ele alan uygulamalar için dijital ikizler kullanılmaktadır. Singapur'un Sanal Singapur girişimi, hücre kuleleri ve güneş pilleri planlamasından trafik düzenlerinin belirlenmesi ve yaya trafiğini simüle etmek gibi birçok şeyi mümkün kılmaktadır (Akio, 2015). Bu sistem, yatırım ve etkinliklerde gerçekçi planlamalar yapılmasına yardımcı olmaktadır.

Dijital ikiz teknolojisine önem veren, bu alanda öncü çalışmalar gerçekleştiren küresel firmalardan biri de Genel Electric'dir. Predix ürünleri ile gaz, buhar ve rüzgar türbinlerinin birer dijital ikizini geliştirmiştir (Power Digital Solutions, 2016). Türbinlerin dönmesi, rüzgara göre doğru pozisyon almaları geliştirilen dijital ikizler ile sağlanmaktadır. Ayrıca, motorların çeşitli bölümlerindeki sıcaklığın kontrol edilmesi ve optimizasyonu da yine dijital ikiz vasıtasıyla yönetilmektedir.

Lastik üreticisi Bridgestone, lastik ömrünü ve performansını iyileştirmek için sensör verileri ile artırılmış dijital ikiz simülasyonlarını birkaç yıldır ARGE çalışmaları için kullanmaktadır. Bir lastiğin ömrü, yük, hız, yol koşulları ve sürüş davranışı gibi sayısız faktörden büyük ölçüde etkilenmekte olup, dijital bir ikiz, birbiriyle ilişkili bu koşulların, çeşitli sürüş koşullarını simüle ederek lastik performansını nasıl etkilediğine ilişkin firmaya fikir vermektedir (Roper, 2020). Dijital strateji ve mühendislik direktörleri tarafından, kârlılığı artırmak, rekabet avantajını sürdürmek, zaman açısından verimliliği arttırmak amacıyla dijital ikiz teknolojisi üzerine çalışmaların sürdürüleceği belirtilmiştir.

Otomotiv sektöründen Tesla ise, ürettiği ve şasi numarasına sahip her bir araç için bir dijital ikizini de üretmektedir. Otomobillerde yer alan sensör verileri, yapay zeka tarafından yorumlanarak arabanın çalışmasında herhangi bir sorun olup olmadığı veya bakıma ihtiyacı olup olmadığı belirlenmektedir (Sen, 2018). Her araç sensörler aracılığıyla dijital ikizine sürekli olarak veri akışı sağlamaktadır. Pek çok bakım sorunu araçlara yapılacak yazılım güncellemeleriyle giderilebilmektedir.

Küresel tüketici ürünleri üreticisi Unilever, fabrikalarında sanal modellerini yaratmayı amaçlayan dijital ikiz projesi başlatmıştır. Bu projeye göre, fabrika makinelerine yerleştirilmiş IoT sensör ve performans verilerini, analiz için makine öğrenme uygulamalarına girdi oluşturmaktadır (Smith, 2019).

Bu teknolojinin kullanıldığı diğer bir fabrika ise Adidas'a ait SpeedFactory'dir.

SpeedFactory'de kullanılan dijital ikiz teknolojisi sayesinde üretim aşamasına geçmeden önce tüm sürecin test ve optimizasyonu gerçek-

leştirilmektedir (Deloitte, 2020). Adidas, dijital ikiz teknolojisine yapmış olduğu bu yatırım sayesinde fabrikasının daha yüksek performansla, hızlı ve şeffaf üretim yapabilecek bir duruma gelmesini sağlamıştır.

7. Türkiye’de Dijital İkiz

Dünya’da yaygınlaşmaya devam eden dijital ikiz teknolojisinde ülkemizde de çeşitli girişimler yapılmış ve yeni projeler üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Türkiye’de dijital ikiz kavramı incelendiğinde ilk olarak Siemens ile Turkcell’in enerji verimliliği konusunda dijital çözümler üzerine gerçekleştirmiş olduğu işbirliği dikkat çekmektedir. Gerçekleştirilen bu işbirliği sayesinde Siemens ve Turkcell akıllı ev platformlarının tam entegrasyonunun sağlanması, kurulan dijital ikiz tabanlı sistem sayesinde %30’a veren enerji tasarrufu elde edilmesinin hedeflendiği belirtilmektedir (Medya, 2017).

Sanayi hammadde girdisi olan sıcak daldırma galvanizli çelik, soğuk haddelenmiş çelik ve sıcak haddelenmiş çelik gruplarında üretim gerçekleştiren Borçelik firması üretim hatlarının modellemesini yaparak bir dijital ikiz projesi hayata geçirmiştir. Bu proje sayesinde %2.5’lik bir verim artışı sağladıklarını açıklamışlardır (Stendustri, 2020).

Gizil Enerji tarafından geliştirilmiş olan Virtual Plant 4.0 çözüm konsepti, Polisan Kansai boya fabrikasında gerçekleştirmiştir. Bu teknoloji de ürün ya da yapının dijital ikizi oluşturulduktan sonra dijital ortamda ürünü tasarlanmakta, üretim aşamaları hesaplanmakta, üretim bantları kurulduktan sonra sanal olarak üretim gerçekleştirilmektedir. Tam olarak hazır olduğunda ise gerçek üretime geçilmektedir. Firma bu teknoloji sayesinde, üretimdeki hata riskini %1 ‘in de altına indirebildiklerini açıklamıştır (Temür, 2019).

Dijital ikiz kapsamında Türkiye’de yaşanan diğer bir gelişme savunma sanayii firmalarından TUSAŞ ve Siemens arasında kurulan bir iş birliği ile gerçekleşmiştir. Bu kapsamda TUSAŞ Milli Muharip Uçak Projesi için, Siemens PLM Software ile üretim tesisinde bütünsel bir dijital ikiz uygulaması için 11 yıllık bir anlaşma imzalamıştır. Bu anlaşma mevcut TUSAŞ projelerinin hızla uygulanmasına ve ürün verilerinin güvende tutulmasına yardımcı olmaktadır. Aynı proje üzerinde çalışan farklı ekiplere aynı veri üzerinden işlem yapabilme imkanı sunulmaktadır. Böylece tasarım ve üretim faaliyetleri eşzamanlı yürütülerek üretim hatalarının azaltılması hedeflenmektedir (Siemens, 2018).

Sayıal ikiz ile ilgili bir diğer örnek ise GE ve GAMA Enerji’nin anlaşma imzaladığı Türkiye’nin ilk dijital enerji santrali olan “İç Anadolu Kombine Çevrim Santrali”dir. Anlaşma ile Türkiye’de ilk defa bir ener-

ji santralinde verimliliği ve üretkenliği artıran endüstriyel bulut yazılım uygulamaları kullanılmış olacaktır. Akıllı şehirler kapsamında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 81 ilin 3 boyutlu dijital ikizinin çıkarılmış olduğu belirtilerek bu teknoloji sayesinde kaçak yapıların tespit edilmesi işlemlerinin gerçekleştirildiği belirtilmiştir (Electric, 2017).

8. Değerlendirme ve Sonuç

Sayısal ikiz teknolojisinin gelecek senaryoları düşünüldüğünde aşağıdaki varsayımlar yapılmaktadır (Cearley et al., 2017):

- **Kısa Vadede:** Dijital ikiz; nesne takibi, optimizasyon ve neredeyse tüm sektörlerde hayati olan kullanıcı deneyimini iyileştirmede yardımcı olacaktır. Önleyici bakımdan öngörücü (koşul tabanlı) bakıma geçiş, özellikle yüksek değer sunmaktadır. Müşteriye sunduğu avantajlar arasında bakım odaklı arıza süresinin azaltılması ve işletme/bakım maliyetlerinin düşürülmesi sayılabilmektedir.

- **Orta Vadede:** İşletmeler ekipman kullanımını planlamak, arızasını tahmin etmek/önlemek ve ekipmanı onarmak gibi fabrika süreçlerini takip etmek ve operasyonel verimliliği artırmak için dijital ikiz teknolojisini kullanacaktır. Ayrıca ürün geliştirme süreçlerinde önceki ürünlerin maliyet, çevre ve performanslarını göz önünde bulundurarak yeni ürünlerin davranışlarını simüle etmede yararlanılacaktır.

- **Uzun Vadede:** Dijital ikizler, ürün ve hizmetlerin nasıl kullanıldığı ve nasıl geliştirilebileceği hakkında bilgi sağlayarak inovasyona yardımcı olacaktır. Örneğin, otomotiv mühendisleri, kazaları azaltmak için yeni özellikler önermek üzere belirli bir aracın nasıl çalıştığını analiz etmek için bir analiz aracıyla birlikte dijital ikizleri kullanabilecektir.

Dünya genelinde yer alan çok uluslu şirketlerin yapmış olduğu projelere ve akademik çalışmalara bakıldığında dijital ikiz teknolojisi yeni olan bir teknoloji olmasına rağmen çok çeşitli alanlarda çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Nesnelerin interneti, yapay zekâ, bulut bilişim, büyük veri teknolojilerinin uygulama alanlarının hızla gelişmesi dijital ikiz teknolojisinin uygulanabilirliğini artırmıştır. Çok uluslu şirketler konunun önemini önceden anlayarak gerekli çalışmaları yapmış ve konuyla ilgili ürünler ortaya çıkarmaya başlamışlardır. Dijital ikiz teknolojisi, performans artışı, zaman, ve maliyet tasarrufu, sistem ömrünü uzatması gibi avantajları sayesinde kendisine yatırım yapan kurumlara önemli getiriler sağlamaktadır. Ayrıca dijital ikiz teknolojisinin kullanımı ile elde edilecek; kullanılan aracın ömrü, kullanım durumu, yaşanabilecek olası arızaların öngörülmesi gibi istatistiksel bilgiler sistemlerin geliştirilerek daha aktif kullanılmasını sağlayacak, ansızın oluşabilecek hatalara/problemlere/hasarlara karşı koruyacaktır.

Kaynakça

- Akio. (2015). Creating an Intelligent 3D Model to Improve Experiences of Residents, Business and Government. Retrieved July 10, 2021, from Dassault Systems website: <https://blogs.3ds.com/perspectives/virtual-singapore-creating-an-intelligent-3d-model-to-improve-experiences-of-residents-business-and-government/>
- Cearley, D. W., Burke, B., Searle, S., & Walker, M. J. (2017). *Top 10 Strategic Technology Trends for 2018*.
- Deloitte. (2020). Digital Twins: Bridging the Physical and Digital. Retrieved July 9, 2021, from Deloitte website: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/tech-trends/2020/digital-twin-applications-bridging-the-physical-and-digital.html>
- Diaz, V. M., Viceconti, M., Stroetmann, K., & Kalra, D. (2013). Roadmap for the Digital Patient. *Discipulus: European Commission*, (May), 2–134. Retrieved from https://www.vph-institute.org/upload/discipulus-digital-patient-research-roadmap_5270f44c03856.pdf
- Digital Twins for Better Health. (2020). Retrieved July 9, 2021, from Alacris Theranostics website: <http://www.alacris.de/future-healthcare/>
- Electric, G. (2017). GE ve GAMA Enerji'den Türkiye'nin ilk Dijital Enerji Santrali! Retrieved July 10, 2021, from General Electric website: <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-ve-gama-enerjiden-turkiyenin-ilk-dijital-enerji-santrali>
- Kasey Panetta. (2017). Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017 - Smarter With Gartner. Retrieved March 2, 2020, from <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/>
- Manufacturing, A. (2020). It's a Twin Win with Digital! Retrieved July 10, 2021, from AeroSpace Manufacturing website: <https://www.aero-mag.com/ifs-mro-digital-twin-aerospace-15052020/>
- MarketsandMarkets. (2020). IoT in Healthcare Market. Retrieved July 9, 2021, from MarketsandMarkets website: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/iot-healthcare.asp>
- Medya, T. (2017). Turkcell ve Siemens Ortaklığıyla Enerjide Yüzde 30 Tasarruf. Retrieved July 10, 2021, from Turkcell Medya website: <https://medya.turkcell.com.tr/bulletins/turkcell-ve-siemens-ortakligiyla-enerjide-yuzde-30-tasarruf/>
- Moore, S. (2019). Top Trends From Gartner Hype Cycle for Digital Government Technology. Retrieved July 9, 2021, from Gartner website: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-from-gartner-hype-cycle-for-digital-government-technology-2019>

- Panetta, K. (2019). 5 Trends Appear on the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies. Retrieved July 9, 2021, from Gartner website: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-appear-on-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2019/>
- Power Digital Solutions, G. (2016). GE Digital Twin. *GE Power Digital Solutions*.
- Roper, J. (2020). Digital Twins Are Virtual Replicas of Real-World Assets Dynamic Simulations of Physical Behavior in Facets Ranging from a Single Tire to a Whole Factory. *Double Act*. Retrieved from www.tiretechnologyinternational.com
- Sen, A. (2018). Bridging the Gap Between Industrial Assets and the Digital World. Retrieved July 10, 2021, from Hcltech website: <https://www.hcltech.com/blogs/digital-twins-bridging-gap-between-industrial-assets-and-digital-world>
- Siemens. (2018). Dijital İkiz Programı İnovasyona Hız Katacak. Retrieved July 10, 2021, from Siemens website: https://www.siemens.com.tr/web/1199-19106-1-1/siemens_turkiye_-_tr/siemens_turkiye/basin_bultenleri/dijital_ikiz_programi_inovasyona_hiz_katacak_
- Smith, J. (2019). Unilever Uses Virtual Factories to Tune Up Its Supply Chain. Retrieved July 10, 2021, from wsj.com website: <https://www.wsj.com/articles/unilever-uses-virtual-factories-to-tune-up-its-supply-chain-11563206402>
- Stendustri. (2020). Verimliliğe Direkt Katkı Sağlayan 3 Ayrı Proje. Retrieved July 10, 2021, from Stendustri website: <https://www.stendustri.com.tr/otomasyon/verimlilik-direkt-katki-saglayan-3-ayri-proje-hayata-gecirdi-h106609.html>
- Systems, D. (2017). Dassault Systèmes' Living Heart Project Reaches Next Milestones in Mission to Improve Patient Care. Retrieved July 9, 2021, from Dassault Systems website: <https://www.3ds.com/press-releases/single/dassault-systemes-living-heart-project-reaches-next-milestones-in-mission-to-improve-patient-car/>
- Temür, Ö. (2019). Türkiye'nin ilk Dijital İkiz projesi Polisan'dan. Retrieved July 10, 2021, from Türkiye Gazetesi website: <https://www.turkiyegazetesi.com.tr/teknoloji/614245.aspx>
- Yefim Natis , Simon Jacobson , Martin Reynolds , Alfonso Velosa , Benoit Lheureux , Marc Halpern , David Cearley, W. R. S. (2017). Innovation Insight for Digital Twins — Driving Better IoT-Fueled Decisions. Retrieved July 9, 2021, from Gartner website: <https://www.gartner.com/en/documents/3645341/innovation-insight-for-digital-twins-driving-better-iot->

Bölüm 6

BİYOMALZEMELER İÇİN HÜCRE KÜLTÜRÜ ÇALIŞMALARI

Sevda ALBAYRAK¹
Beyza KÜTÜK²
Canser GÜL³

1 Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara/Türkiye, sevdatas@gazi.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-1504-8061

2 Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara/Türkiye, beyzktk@gmail.com

3 Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 45100, Manisa/Türkiye, canser.gul@cbu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-1339-936X

1. GİRİŞ

Biyomalzemeler, insan vücudundaki canlı dokuların işlevlerini kaybetmesi sebebiyle bunu yerine getirmek ve desteklemek amacıyla geçici veya kalıcı olarak vücut içerisinde kullanılan doğal veya sentetik yapılmış malzemelerdir. Biyomalzeme biliminin önemi son yıllarda daha çok vurgulanmasına rağmen, uygulamalarda kullanımı çok daha eskiye dayanmaktadır. Ayrıca bu malzemeler yalnızca implant olarak vücut içerisinde değil, vücut dışında kullanılan ve vücutla temas halinde bulunan cihazlarda, çeşitli eczacılık ürünlerinde ve tanı/teşhis kitlerinde de yaygın kullanıma sahiptir. Hasarlı sert dokular yerine sentetik malzemelerin cerrahi müdahaleler ile yerleştirilmesi uygulanmakta olan bir yöntemdir. İşlemin uygulandığı bölge, yapay malzemenin yerini alacağı sert veya yumuşak doku malzeme seçiminde belirleyici bir faktördür. Bu seçimler yapılırken gerçek doku yerine geçecek olan biyomalzemenin hem fiziksel hem mekanik özellikler olarak yerini alacağı dokuyu taklit edebilir nitelikte olup, gerekli yeterlilikleri sağlayabilmesi gerekmektedir. En önemlisi de, bu özellikler sağlanırken vücut içerisine yerleştirildiğinde, çevre dokular ve vücutta bulunduğu bölgenin sıvısı ile temas esnasında toksik olmaması, biyoyum sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle biyomalzeme uygulamalarında kullanılacak olan malzemelerin özenle seçilmesi ve gerekli tüm tedbirlerin alınması gerekmektedir. Biyolojik (canlı doku) ve mekanik uyumluluğu içeren biyoyumluluk terimi, biyomalzemeler için temel gerekliliktir. Bir malzemenin biyolojik olarak uyumlu olması demek, kullanılan malzemenin çevresindeki dokularla zararlı olabilecek etkileşimde bulunmaması (pıhtı oluşumu, iltihaplanma, vb.) ve vücuda toksik, alerjik ve kanserojen etkisinin olmaması, yani vücutla tepkimeye girmemesi gerektiği anlamına gelmektedir. Geliştirilen bir biyomalzeme için biyoyumluluk ve hücre canlılığı gibi ölçütlerin değerlendirilmesi çeşitli çalışmalar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Öncelikle laboratuvar ortamında biyomalzemenin vücutta kullanılacağı ortam taklit edilerek yapay bir vücut ortamı oluşturulur. Daha sonra bu ortama gerekli hücreler ekilerek bu hücrelerin canlılığı, büyümesi ve çoğalması takip edilir. Ayrıca ortam içerisinde malzemenin korozyon davranışı da takip edilebilir. Bu çalışmalar genel bir ifade ile hücre kültürü ve in vitro çalışmalar olarak adlandırılır. Bir malzemenin biyomalzeme olarak kullanılabilmesi için in vitro çalışmalarında başarılı olan malzemelere gerekli etik kurul raporları alınarak uygun hayvanlar üzerinde bir de in vivo performanslarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada hücre kültürü çalışmalarında temel uygulamalar ve çeşitli yöntemlerden bahsedilecektir.

2. HÜCRE KÜLTÜRÜ VE ÇALIŞMA ALANLARI

Hücre kültürü, normal dokulardan veya tümörlerden ekstrakte edilen hücre zincirleri veya ayrılmış hücreleri büyütme tekniğidir (Hoffman,

2006). Hücre kültürü, içinde birçok besin maddesinin bulunduğu bitki ve memeli hücrelerinin izole edilmesiyle elde edilir. Hücre kültürü, bir besiyerinde uygun şartlar (nem, sıcaklık, karbondioksit vb.) altında hücrelere insan vücut ortamının sağlanması anlamına gelmektedir. Bu şekilde yapay insan vücut ortamıyla birlikte hücrelerin çoğalması sağlanmış olur. Hücre kültüründe kullanılacak canlıların organları canlıdan ayrılır ve gerekli işlemler için kullanılır. Hücre kültürü testlerinde birçok canlı kullanılır. Bunlar insan, tavşan, sıçan, maymun, kobay fare ve benzeridir. Bu canlıların böbrek, akciğer, tümör gibi farklı dokuları ve organları kullanılabilir. Uygun şartlar sağlandığında petri kabı ya da flask içerisinde hücreler bekletilir. Bu hücreler buldukları kabın çeperine tutunarak ürerler. Bu üreme sonucunda elde edilen yapı hücre kültürü adını alır (Çiçek ve Bilgiç, 2006; Freshney, 2010; Hill vd., 2019; Hyun ve Angeles, 2019).

Hücre kültüründe en önemli noktalardan biri de kültür ortamının uygun şartlarda olmasıdır. Hücrelerin yaşayabilmesi, işlevlerini yerine getirebilmesi ve üreyebilmesi için gerekli minimal koşulların sağlanması açısından ortam önem taşır. Besiyeri ortamının doğru hazırlanması, sterilizasyon, pH değeri, sıcaklık, nem ve karbondioksit miktarının doğru olması ve optimize edilmesi dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardır (Yazır ve Dalçık, 2012).

Hücre kültürünün de her uygulamada olduğu gibi avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Avantajlarına bakılırsa, in vivo deneylerde, deney hayvanlarında vücut sıcaklığı, ozmotik basınç ve pH değerleri hücre kültürü ortamındaki göre daha az kesinlikte sonuçlar verir. Aynı zamanda hücre kültürü çalışmalarının maliyetine bakıldığında deney hayvanlarında göre daha ekonomiktir. Tekrarlanabilirliği fazladır ve deney hayvanlarında olduğu gibi bir etik kurul izni olmadan testler devam edebilir. Dezavantajları ise hücre kültürü organizmalardan izole ortamlarda yapıldığı için in vivo ortamlarda yapılan testlere göre farklı sonuçlar elde edilebilir. Diğer yandan hücre kültürü yapmak tecrübe ve uzmanlık isteyen bir alandır. Kontaminasyon riski söz konusu olabilir bunlara ek olarak hücrelerin uzun süreli dondurulması ve pasaj sayısının çok fazla yapılması genetik farklılıkların ortaya çıkmasına sebep olabilir (Freshney, 2010; Mitry ve Hughes, 2013).

İn vitro hücre kültürü laboratuvarları araştırmacıların hücre içi ve hücreler arası biyokimyasal etkileşimlerin molekül seviyelerinde araştırılabilmeleri adına hücrelerin temininin sürekli hale getirilmesi ve hücrelere istenilen deneysel çalışmaların uygulanabilmesi için kullanılmaktadır. Hücre kültürü çalışmaları ile (Freshney, 2010):

- İn vitro toksikoloji ile kanser araştırmaları,
- Sitogenetik, biyokimyasal, moleküler biyolojik çalışmalar,

- Hastalıkların tanı ve araştırılması,
- Doku ve deri mühendisliği,
- Aşı üretimi, kök hücre,
- Tüp bebek ve kısırlık tedavileri,
- Farmasötik proteinlerin üretimi yapılabilmektedir.

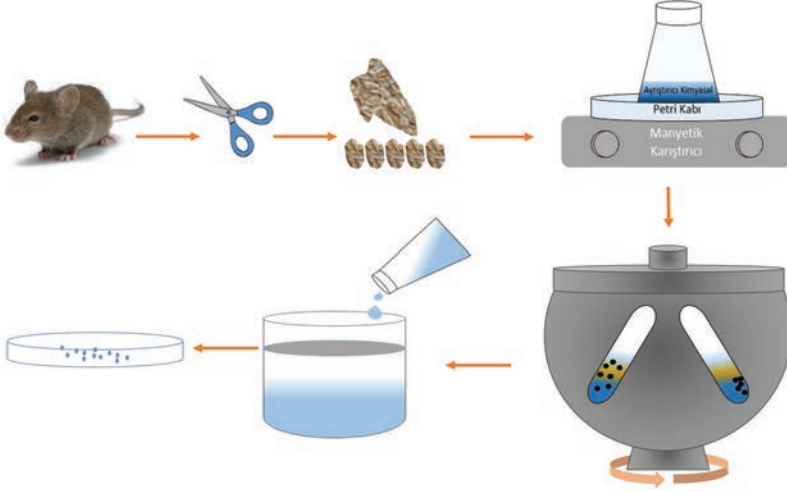
3. HÜCRE KÜLTÜRÜNDE TEMEL PRENSİPLER

Hücre kültür ortamında hücrelerin üretilmesi için kullanılan sıvı ortamlar vardır bunlara hücre üretme vasatı denir. Bu ortamda hücrelerin üreyip çoğalabilmesi için gerekli vitaminler, aminoasitler, mineraller, lipidler, karbonhidratlar, proteinler ve biyonlar bulunur. Bu ortam steril ve pH'ı dengelenmiş izotonik bir ortam olmalıdır.

Hayvan hücrelerinde in vitro kültürleme için öncelikle serum ve diğer kan özütleri gibi biyolojik sıvılardan faydalanılmıştır ve ardından Eagle tarafından minimal gerekli temel ortamın gelişmesini 1955'te 13 amino asit, 8 vitamin, 6 iyonik tür ve diyaliz edilmiş serum bileşeni geliştirilmiştir. Bu sıvı bileşeni Eagle'ın minimal temel ortamı (EMEM) ismini almıştır (Çiçek ve Bilgiç, 2006). Bu ortam, büyüme için gerekli tanımlanmamış gerekli bileşenleri sağlamak için 13 amino asit, 8 vitamin, 6 iyonik tür ve diyaliz edilmiş serumdan oluşuyordu. Daha sonra bu besiyeri çeşitli değişikliklerle günümüze kadar gelmiştir. DMEM (Dulbecco's Modified Minimal Essential Medium) bugün en çok kullanılan besiyeri bileşenlerinden biridir ve bunun gibi farklı bileşenlerde pek çok ticari bazal medium mevcuttur. Bu ortamlar tek başına kullanım için yeterli değildir. Bu vasatlara bunların dışında, üremeyi teşvik amaçlı serum ve kontaminasyona karşı da antibiyotik ve antimikotik ilaveleri yapılır (Adams, 1396; Freshney, 2010; Meleady ve O'Connor, 2006; Mitry ve Hughes, 2013; Ozturk ve Hu, 2006).

Hücre kültür çalışmalarında hücre çözme, vasat değiştirme, pasajlama (alt kültürleme) ve hücreleri dondurma işlemleri sırayla düzenli bir şekilde yapılmaktadır (İplik ve Çakmakoğlu, 2020). Bu çalışmalar yapılırken temiz odada steril olarak çalışılması kontaminasyon olmaması bakımından gerekliliktir. Kültür çalışması için genel bir ifade ile öncelikle gerekli dokunun bulunduğu organdan parça makas yardımıyla alınır. Bu doku parçası uygun şekilde dilimlere ayrılarak Trispsin ile ayrıştırıldıktan sonra karışım santrifüj edilir ve üst yüzeyde pelet haline gelen dokudan sıvı uzaklaştırılır. Elde edilen çökelti dengeli buffer solüsyonu ile yıkılarak tekrar santrifüj edilir. Sıvı tekrar uzaklaştırılır ve hücreler toplanır. Hücre üremesi için kültür kaplarına ekim yapılır. Bu işlem basamakları Şekil 1'de sırası ile verilmiştir. 37 °C'lik etüvde inkübe edilir. Mikroskop-

ta hücrelerin üreme durumlarını kontrol edilir ve sayımı yapılır. İhtiyaç hâlinde pasajlama yoluyla hücreler çoğaltılır. Son olarak hücreler bir sonraki kullanıma kadar sıvı azot tankında dondurularak saklanır (Freshney, 2010; Hyun ve Angeles, 2019; Meleady ve O'Connor, 2006; Mitry ve Hughes, 2013; Yang vd., 2020).



Şekil 1. Hücre kültürü çalışmalarında genel işlem basamakları.

3.1. Dondurulmuş Hücrelerin Çözdürülmesi

Satın alınmış veya laboratuvarlarda üretilmiş ve daha sonra çalışılmak için dondurulmuş hücreler, uygun koşullar sağlanarak çözdürülür. Hücrede herhangi bir kristalleşme olmaması için zaman kaybetmeden çözdürülecek olan hücrenin işlemi yapılmalıdır. Dondurulmuş hücreler saklandıkları ortamdan alınır ve vakit kaybetmeden 37 °C'de yaklaşık 1-2 dakika su banyosunda çözdürülür. Çözülen hücredeki homojenliği sağlamak için yaklaşık 5-10 dakika boyunca 800-1000 rpm devir arasında santrifüj edilir. Santrifüj işleminin ardından üstte kalan sıvı süpernatant atılıp dibе çökmüş olan hücre kısımları ayrılır, hücrelerin sayımı yapılır ve ardından hücrelere uygun görülen büyüme ortamlarına alınır ve sıcaklık 37 °C de sabitlenir. Hücrelerin üzerine 5-10 ml serum içeren hücre üreme vasatı eklenir ve bu besiyerinde büyümeleri sağlanır. Bir gün sonra besiyerine konulmuş hücreler kontrol edilir, ölen hücreler uzaklaştırılır ve hücre üreme vasatı yenilenir bu işlemlerin ardından hücreler 37 °C'lik etüvde bekletilmeye devam edilir (Meleady ve O'Connor, 2006; Mitry ve Hughes, 2013).

3.2. Besiyerinin Tazelenmesi

Bu işlem hücre kültürünün temel adımlarında düzenli olarak uygulanır. Hücrelerin istenilen biçimde üremesi ve büyümesi için besi ortamının

stabilitesi sağlanmalıdır bunun için de hücre ile çalışılan zaman boyunca belli periyotlarla yapılmalıdır. Hücreler 37 °C'lik CO₂'li inkübatörlerde ve büyüme ortamlarında istenilen büyüklüğe ulaşıncaya kadar bekletilirler. Besleme aşaması boyunca hücreler ekilmiş oldukları büyüme ortamından (flasklar) büyümeleri için gerekli olan besinleri alarak metabolik olayları devam ettirirler, yeterli büyüklüğe ulaştıklarında bölünürler ve pasajlama için uygun koşulları sağlamış olurlar. Hücrelerin pasajlanması için uygun büyüklüğe gelmesi aşaması yaklaşık olarak 24-72 saat aralığında gerçekleşir, bu süre hücreden hücreye göre değişiklik gösterir. Hücreler büyürken besiyerinden kullandıkları besinlerle beraber ortamın pH'ında değişiklikler meydana gelir ve bu olay hücre besiyerinde istenmeyen bir durumun ortaya çıkmasına sebebiyet verir, bu yüzden ki pH değişikliği görülmeye başlandığı zaman ortamın stabilizasyonunu sağlamak için besiyeri değişimi yapılır. Besiyeri değişiminin yapılması gereken zaman da çok önem taşır eğer olması gerekenden önce besiyeri ortamı değiştirilirse henüz büyümemiş tutunamamış hücreler de değiştirilen besiyeri ile birlikte ortamdan uzaklaşır bu da hücre kültürü verimini düşürmüştür olur. Bu yüzden bu süreçte mikroskop ile takibin düzeni yapılmalı ve hücrelerin karakteristik yapıları incelenmelidir. Hücre kültürü temel prensiplerinde önemli bir adım olan besiyeri değişiminin düzenli olarak takibinin yapılması, yapılacak olan çalışmada verimi arttırmada önemli rol oynayan bir basamaktır (Meleady ve O'Connor, 2006; Mitry ve Hughes, 2013).

3.3. Hücrelerin Pasajlanması (Alt Kültürleme)

Hücreler kendilerine özgü belli hızlarda bölünerek sayılarını her seferinde ikiye katlayarak ürer ve çoğalırlar. Sağlıklı hücreler vasattan beslenerek ve yüzeye tutunarak petri kabına yayılırlar. Flaksta hücrelerin tüm yüzeyi kaplamış haline konfluent denir. Besiyerinde çoğalarak petrinin tüm yüzeyini kaplayan hücreler vasat içerisindeki besinlerin büyük bir kısmını tükettiğinden ve petri içerisinde çoğalma için kullanılacak alan kalmadığından üreme hızları son derece azalır ve durma noktasına gelir. Bu durum hücrelerin ölümü ile sonuçlanabileceği için bunu engellemek amacıyla pasajlama yapılması gerekir. Üreme hızı çok yavaşlayan bu hücrelerin flakstan alınarak yeni bir flaksa yani büyüme ortamına alınması gerekir ki tekrar tekrar çoğalabilsinler. Bazı hücreler çoğalırken yüzeye tutunmaya ihtiyaç duyarken (monolayer) bazıları ise süspanse halde tutunmadan üreyebilirler. Tutunarak çoğalan ve süspanse kültürlerde pasajlama işlemi farklı şekillerde yapılır. Monolayer kültürlerin pasajlanmasında öncelikle yüzeye tutunmayı sağlayan Ca⁺² ve Mg⁺² iyonlarının enzim ve kimyasallar yardımıyla veya çalkalama ve mekanik yollarla ortadan kaldırılması gerekir. Ayırma işlemi tamamlandıktan sonra enzim ve kimyasallar uzaklaştırılır veya besi ortamı ile seyreltilebilir. Süspanse kültürlerde ise kültür hacmine göre uygun hacimlerde bölünen kültürdeki hücrelerin

besi ortamından santrifüjlenerek ayrılması ve yeni besiyeri ilavesiyle uygun konsantrasyona seyreltilmesi ile gerçekleştirilir (Adams, 1396; Freshney, 2010; Meleady ve O'Connor, 2006; Mitry ve Hughes, 2013).

3.4. Hücre Kültürü Mikroskopik Hücre Sayım Yöntemleri

Hücre sayımı, belirli zamanlarda kültür durumunu ölçme ve takip etmede kullanılır ve alt kültürlemenin zamanının belirlenmesinde faydalıdır. Hücre sayısı, mililitre ortam başına hücre sayısı (süspansiyon kültürleri için) veya tutunduğu yüzeyin santimetrekare alanı başına (tek tabakalı kültürler için) hücre sayısı olarak ifade edilebilir (Freshney, 2010; Hoffman, 2006).

Hücre kültüründe birçok mikroskopik hücre sayım yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden ilki *Thoma lamı ile hücre kültür sayımı*dır. Thoma lamında hücre sayım esası $0,1 \text{ mm}^3$ hacimde yapıyor olmasıdır. Bu sayımda lamın üzerinde $0,1 \text{ mm}$ 'lik bir çukur mevcuttur ve hücreler bu çukur kısım içine konulur, daha sonra santrifüj edilir ve istenmeyen kısım alındıktan sonra hücre peleti ayrılır, mikroskopta inceleme yapabilmek için kimyasallar eklenir daha sonra boyanmamış (canlı) ve boyalı (cansız) hücreler sayılır. Bir diğer sıklıkla kullanılan yöntem ise *Petroff - Hausser sayımı*dır. Bu sayımın en büyük özelliği, sayım yapılacak lamın derinliğinin $1/50$ ($0,02$) mm olmasıdır, derinliğin $0,02 \text{ mm}$ oluşu bu lamı 5 kat daha ince yapar. Bu da bu yöntemi Thoma lamı ile sayıma göre daha fazla kesinliği ve doğruluğu olan bir yöntem haline getirir. Bu yöntemlerin dışında bir de *Breed yöntemi* vardır. Bu yöntemde genelde bakteri sayımı yapılır ve sayım yapılacak olan alan 1 cm^2 'lik bir lam üzerine yayılır. Bu yöntemde ilk olarak çalışılacak olan alanın mikroskop ile belirlenmesi sağlanır ve ardından 1 cm^3 'lük o alandaki bakteri sayısının $0,01 \text{ ml}$ 'de kaç olacağı hesaplanır. Daha sonra 100 ile çarpılarak 1 ml 'deki bakteri sayısına ulaşılmış olur (Freshney, 2010; Hoffman, 2006).

3.4. Hücre Dondurma ve Saklama Koşulları

Hücreleri dondurmaktaki asıl amaç uzun süreler boyunca devam eden hücre kültüründe düşen verim ve kontaminasyon riskini ortadan kaldırmak ve hücreleri başka çalışmalarda da kullanabilmektir. Ayrıca hücre kültür koleksiyonu oluşturmak içinde hücrelerin dondurulması gerekir. Hücre kültürü temel adımlarından biri olan çözdürme işleminin verimliliği ile dondurma işleminin başarısı doğru orantılıdır. Bu adım için hücrelerin metabolik faaliyetlerinin yavaşlayıp durması gerekmektedir. Bu yüzden de çalışılması gereken uygun sıcaklık $-76 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadardır. Dondurma işlemi sırasında soğutma hızı ve derecesinin ayarlanması termal şok ve hücreye verilecek zarara engel olunması açısından büyük önem taşır. Yapılan çalışmalar gösterir ki uzun vadede ve en verimli stoklama işlemi $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de azot tankında olmalıdır (Meleady ve O'Connor, 2006).

Hücre kültüründe yapılan dondurma ve stoklama işleminin aşamalı olarak devam ettirmesinin bir diğer önemi de ani soğumalarda hücre içi istenmeyen kristalleşmelerin olmasının önüne geçmek ve hücre membran yapısına herhangi bir olumsuz etki oluşturmak istememektir. Bu nedenle hücreler, dondurma ve çözündürme aşamalarında maksimum verim ve en düşük kontaminasyon riski için kriyoprotektan denilen bağlayıcı, koruyucu ajanlar ile kristalizasyon hızını yavaşlatır ve bu da hücrelerin ozmotik basıncında bir değişikliğe sebep olmadan hücrelerin herhangi bir hasarı ortaya çıkmadan dondurulmasını sağlar. Bu bağlayıcı ajanlar hücre membranından geçebilme kabiliyetine göre iki grupta incelenir; permeatingler, hücre membranından geçebilen ajanlardır, non-permeatingler ise hücre membranından geçebilme özelliği bulunmayan bağlayıcı ajanlardır. Permeating ajanlara örnek vermek gerekirse, dimetil sülfoksit (DMSO), gliserol, etilen glikol (EG), 1,2 propandiol, 2,3, bütandiol, propilen glikol gibi bazı alkoller sayılabilir. Non-permeating ajanlara ise, glikoz, sükroz, trehaloz, polivinil alkol (PVA), polivinil pirolidon (PVP) gibi bazı polimerler örnek verilebilir.

Hücrelerin, kültür ortamında çok uzun süreler boyunca aynı verim ve hızda gelişip üremesi mümkün değildir, bir süre sonra verim, ortam koşullarındaki değişmeye bağlı olarak azalmaya başlar ve bu da hücre hattının devamlılığına engel olur. Bu yüzden olumsuz durumlar ile karşılaşmamak için hücreler uzun ya da kısa süreler boyunca saklanır. Hücre kültürlerinin stoklanmasının birçok yararı vardır. Bunlar; istenilen ve önem taşıyan hücre hatlarının korunmasını, yapılan çalışmalarda önceki adımlara dönülmesi ihtimaline karşı hücrelerin hazırda bulunması, pasaj sayısı aynı birçok hücre ile farklı zaman dilimlerinde çalışabilme olanağı ve pasaj sayısının ilerlemesine bağlı olarak hücrede meydana gelebilecek fenotipik değişikliklerin önlenmesini sağlar (Freshney, 2010; Meleady ve O'Connor, 2006).

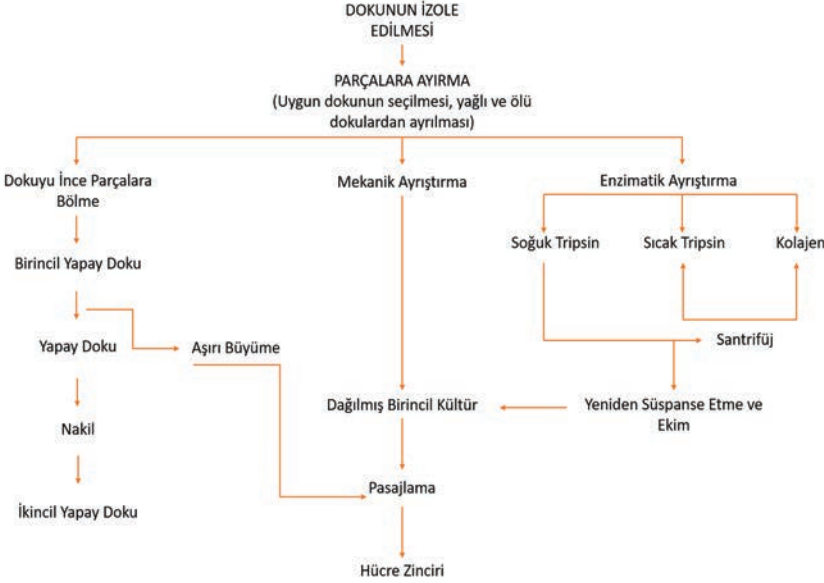
Hücre kültürlerinin saklanması hücrelerin dondurulması esasına dayanır. Hücre yapısında herhangi bir bozulma olmadan hücrelerin saklanması için hücre içi metabolik faaliyetlerin durmuş olması gerekmektedir. Farklı saklama koşullarında, farklı sürelerde hücrelerin canlılığı korunabilmektedir. Örneğin; oda sıcaklığında saklanan numuneler 1 haftaya kadar canlılığını sürdürürken, -70 ile -86 °C arasında saklanan hücreler 6 ay ile 5 yıl arasında canlı kalabilirler. -150 °C'den düşük sıcaklıklarda ise süresiz olarak hücreler saklanabilirler (Freshney, 2010; Mitry ve Hughes, 2013).

4. HÜCRE KÜLTÜRÜ ÇEŞİTLERİ

4.1. Primer Hücre Kültürü

Primer hücre kültürleri genelde heterojen bir yapı gösteren, hücre hatları gibi tek tip hücreler olmayan ve direkt olarak dokudan elde

edilen hücre kültürleridir. Primer hücre kültürlerinin 1 veya 2 defa pasajı yapılabilir. Primer hücre kültürleri genelde fetal orijinli insan ve hayvan dokularından hazırlanır ve orijin doku ile aynı özelliklere sahiptir. Küçük doku parçaları petri yüzeyine ekilir ve bu hücreler eksplant ya da enzimatik şekilde uygulanarak tek hücre süspansiyonu haline getirilir. Bu hücre kültürlerinin kontaminasyon riski yüksektir. Bu yüzden çalışılan ortamın sterilizasyonuna, kullanılan malzemelerin otoklavlanmış olmasına özen gösterilmeli ve tüm işlemler laminar kabin içinde yapılmalıdır (Freshney, 2010; Mitry ve Hughes, 2013). Şekil 2’de primer hücreler için uygulanabilecek seçenekler verilmiştir.



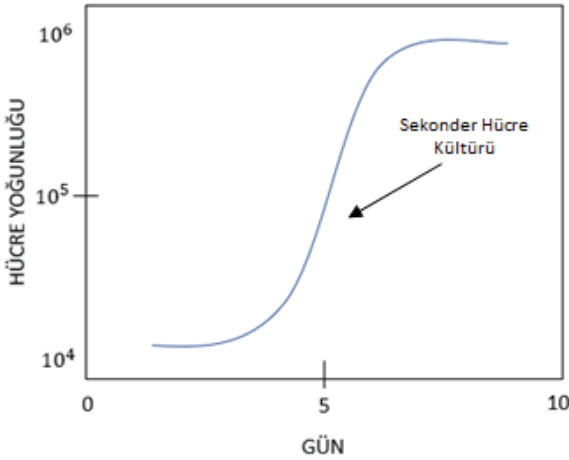
Şekil 2. Primer kültür seçenekleri (Freshney, 2010).

Primer hücre kültürü hazırlanırken kullanılacak organ ve dokuların seçiminde;

- Deneysel hayvanlarının genç olmasına,
- Deneysel hayvanlarının fetal dönemde bulunmasına,
- Sağlıklı deneysel hayvanı seçilmesine,
- Seçilecek olan hayvanların dokularında herhangi bir patolojik lezyon olmamasına,
- Taşıma esnasında seçilen doku ve organlar üzerinde herhangi bir kimyasal madde kullanılmamasına dikkat edilmelidir.

4.2. Sekonder Hücre Kültürü

Primer hücre kültüründe üretilmiş olan hücrelerin tekrardan uygun ortamlara konulup üretilmesine sekonder hücre kültürü denir. Hücrelerin alınıp tekrardan üretilmesi işlemine ise pasajlama adı verilir. Sekonder hücre kültüründe pasajlama sayısı 40-50 tekrarı bulabilir. Bu yöntemle üretilmiş hücre kültürlerinin yaklaşık % 75'i asıl hücre ile aynı karyotipe sahiptir. Bu hücreler genelde hayvan ve fetal orijinli insan dokularından elde edilir. Bu yöntem hücre hattının genişlemesine olanak sağlar. Sekonder hücre kültüründe hücrelerin büyümesi Şekil 3'teki gibi hücrelerin ekilmiş olduğu başlangıç fazından logaritmik fazına kadar olan süre boyunca devam eder. Eğer oluşturulmuş besiyerinde hücreler ekim yapılmış olan bütün yüzeyi kapladıysa ve daha fazla büyüyecekleri yer kalmadıysa, hücre çoğalması hızlı bir şekilde düşer ve son olarak da durur (Freshney, 2010; Mitry ve Hughes, 2013; Terzioğlu vd., 2013).



Şekil 3. Hücre kültüründe karakteristik büyüme modeli (Terzioğlu vd., 2013).

4.3. Cell Line Hücre Kültürü

Cell line hücre kültürü viral enfeksiyon çalışmalarında sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile üretilen hücrelere 20-30 kadar pasajlama işlemi yapılabilir ve bu pasajlama işlemlerinde herhangi bir morfolojik ve kromozomal değişikliğe uğramaz. Cell line hücre kültürleri primer kültürlerin pasajlanmasıyla elde edilir. Laboratuvar ortamında kullanılması ve devamlılığının sağlanması oldukça kolaydır. Mevcutta farklı çeşitlerde pek çok hücre hattı vardır ve talep eden ülkelere belli merkezlerden (hücre bankalarından) gönderilmektedir (Freshney, 2010).

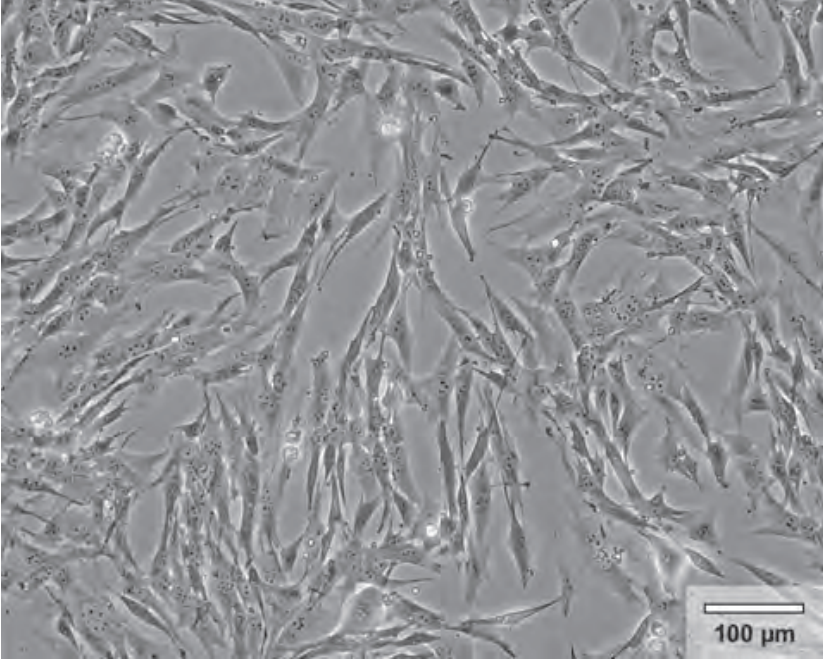
4.4. Devamlı Hücre Kültürü

Devamlı hücre kültürleri primer ve sekonderden farklı olarak pasajlama sayısında bir sınırlama bulunmayan kültürlerdir, sonsuza kadar pasajlama işlemi gerçekleştirilebilir. Bu hücreler de insan ve hayvan dokularından elde edilir. Bunun yanı sıra tümör dokusundan da orijin alınır. Devamlı hücre kültürlerinin fenotipik ve genotipik özellikleri orijinal dokudan farklılık gösterir, karyotiple olan benzerliği %75'inden azdır. Bu yöntemde hücrelerin kromozom sayısında değişiklik olduğu için anormal olarak kabul edilir (Freshney, 2010).

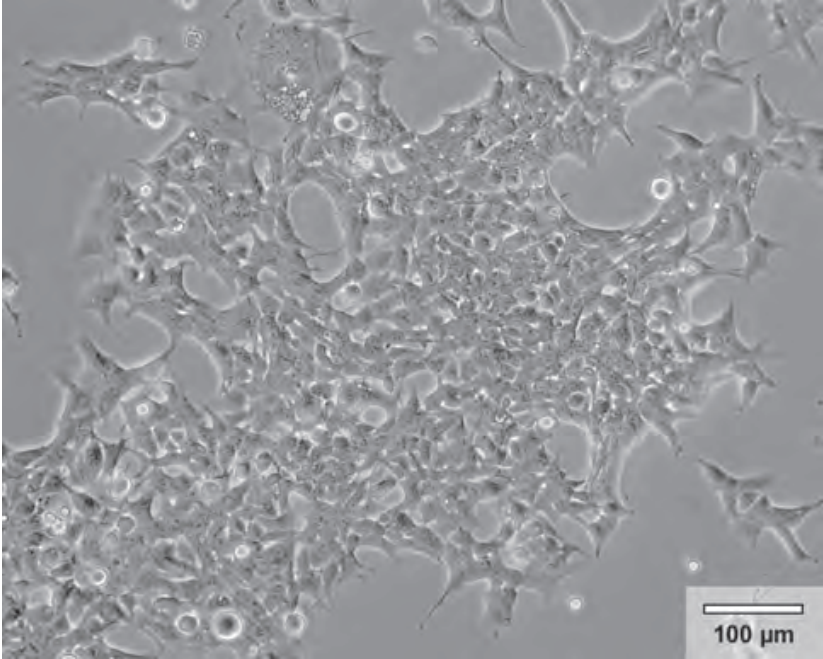
Hücre tipine göre pasaj uygulama sayısı ve karyotipin orijinallığı farklılık gösterir. Primer Hücre kültürlerinde pasajlama 1-2, sekonder hücre kültüründe 40-50 iken devamlı hücre kültürlerinde ise sonsuz sayıda yapılabilmektedir. Primer kültürden yapılan pasajlamada %100 karyotip orijinallığı söz konusu iken, pasajlama sayısı arttıkça karyotipin orijinallığı de azalmaktadır.

4.5. Hücre Kültüründe Yer Alan Hücrelerin Morfolojisi

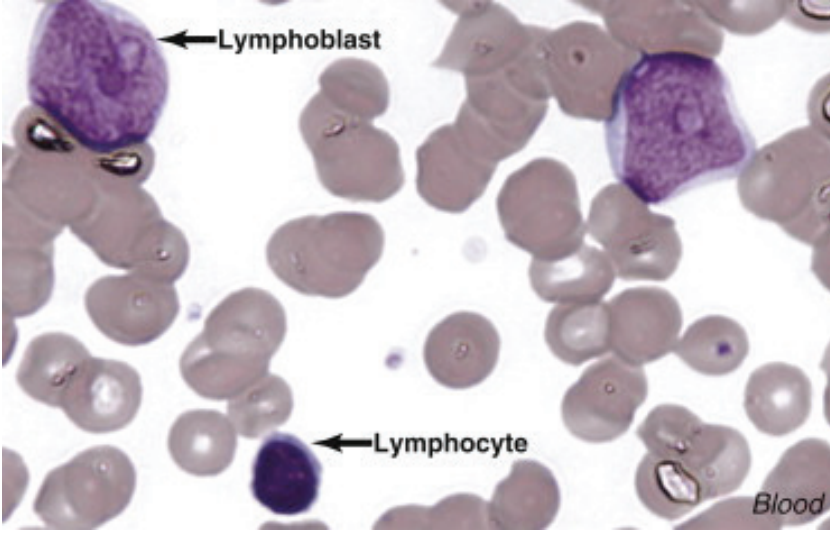
Işık mikroskobu altında hücre kültüründe büyüyen hücrelerin morfolojisi incelenebilir. Bu hücrelerin morfolojisi ise 3 farklı tiptedir. Fibroblastik hücreler, bu hücreler Şekil 4'te görüldüğü gibi çift veya daha fazla kutupludur ve ince uzun şekilli ve substrata tutunarak büyüyen hücrelerdir. Epitelyal benzeri hücreler, Şekil 5'te görüldüğü gibi çokgen ya da belirli şekilleri olan, substrattan ayrı olarak büyüyen hücrelerdir. Lenfoblast benzeri hücreler ise Şekil 6'te olduğu gibi küre şekillidir ve fibroblastik hücreler gibi substrata tutunarak büyür (Freshney, 2010). Lenfoblastlar, sınırlı pasaj sayısına ve sınırlı bir ömre sahip olan fibroblast hücrelerinin aksine ölümsüz hücrelerdir (Chuang ve Chuang, 2000; Freshney, 2010).



Şekil 4. Fare böbreğine ait fibroblast hücrelerinin mikroskop görüntüsü (Freshney, 2010).



Şekil 5. İnsan embriyonik böbrek epitel hücrelerinin mikroskop görüntüsü (Freshney, 2010).



Şekil 6. Lenfoblast hücresinin mikroskop görüntüsü (Kotarbinski, 2014).

5. HÜCRE KÜLTÜRÜ UYGULAMA YÖNTEMLERİ

5.1. Standart Tüp Kültürü Yöntemi

Genel olarak tüm virüslerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerin başındadır. Pasajlanan hücreler standart laboratuvar tüplerinin içine yerleştirilir ve belli aralıklarla santrifüj edilir (10-15 rph). Isının da yardımıyla tüp yüzeyinde tek tabaka hücre dizisi oluşturulmuş olur. Tüplere hücreler ekildikten sonra bekleme süresi değişken olmakla birlikte tüpler 14 gün süre ile inkübe edilir.

5.2. Shell Vial Hücre Kültürü Yöntemi

Bu yöntemde tüpler içine yuvarlak lameller yerleştirilir. Hücreler bu lameller üzerine pasajlanır. Hücre ekimi tek tabaka olacak şekilde yapıldıktan sonra santrifüjleme işlemi yapılır. Bu işlemin hızı ve süresi ekimi yapılmış olan hücreye göre değişiklik gösterir. Bu yöntemdeki amaç, ekimi yapılmış olan örnek hücrede bulunan etkenin hücre hattı içine girişini hızlandırmak ve bu süreci kısaltmaktır. Enfeksiyon nedeniyle hücrede herhangi bir tespit edilebilir değişiklik sitopatik etki olarak bilinir ve bu yöntemde standart tüp sitopatik etki yapması beklenemez (Freshney, 2010).

5.3. Kokültivasyon Yöntemi

Bu yöntemde incelenen dokular daha önceden üretilmiş hücrelerdir. Bu hücrelerin kültürü birlikte yapılır. Önceden üretilmiş hücre kültürlerinin avantajı örnek hücredeki canlılık ve sürekliliği sağlamaktır. Kokültivasyon yöntemi HIV tanısında etkin rol oynar. Tanı yapılacak kişiden

alınan periferik mononükleer hücre (PMH) ile HIV vericiden uyarılan PMH'ler özel besiyerinde birlikte kültürlenir ve inkübe edilir. Sitopatik etki, çeşitli metotlarla veya reverse transkriptase (RT) enzim aktivitesi veya p24 antijeni aktivitesi incelenerek saptanır. Ortalama 10. Günden itibaren %90 ihtimalle saptanması mümkündür.

5.4. Tek Tabaka Hücre Kültürleri

Hücre kültürleri inkübasyon sırasında mekanik olarak karıştırılır bunun amacı ekimi yapılan hücrelerin yüzeye yapışmasını önlemektir. Karıştırma sonucunda üreyen hücreler sıvı içinde süspansiyon halde bulunur. Bu durum da hücrelere çok sayıda üreme imkânı tanır. Tek tabaka hücre kültür yöntemi genellikle antijen ve aşı hazırlanmasında kullanılırlar (Freshney, 2010).

5.5. Süspansiyon Yöntemi

Bu yöntem süspansiyon kültüre uyum sağlayabilen hücreler için uygundur (Ör., hematopoetik). Doku kültürü amaçlı hazırlanmamış kültür kaplarında sürdürülebilir fakat yeterli gaz değişimi için sallama ve karıştırma gibi uyarılara ihtiyaç vardır. Bu yöntemde pasajlama kolaydır, ama sınırlayıcı bir özelliği olarak büyümeyi takip edebilmek için her gün hücre sayımı yapılmalıdır (Freshney, 2010).

KAYNAKÇA

- Adams, R. L. P. (1396). Cell Culture for Biochemists, Volume 8. In R. H. Burdon ve P. H. van Knippenberg (Eds.), *Elsevier Science* (2.). Elsevier.
- Chuang, J. L. ve Chuang, D. T. (2000). Diagnosis and mutational analysis of maple syrup urine disease using cell cultures. *Methods in Enzymology*, 324(1977), 413–423.
- Çiçek, C. ve Bilgiç, A. (2006). Klinik Virolojili Laboratuvarında Uzmanlık Öğrencisine verilen Hücre Kültürü Eğitim Programı: Bir Model. *İnfeksiyon Dergisi*, 20(3), 231–241.
- Freshney, R. I. (2010). *Culture of Animal Cells, a Manual of Basic Technique and Specialized Applications* (6.). Wiley-Blackwell.
- Hill, A. B. T., Bressan, F. F., Murphy, B. D. ve Garcia, J. M. (2019). Applications of mesenchymal stem cell technology in bovine species. *Stem Cell Research and Therapy*, 10(1), 1–13.
- Hoffman, T. L. (2006). Counting cells. In J. E. Celis, T. Hunter, N. Carter, D. Shotton, J. V. Small ve K. Simons (Eds.), *Cell Biology, Four-Volume Set* (3., Vol. 1, pp. 21–24). Academic Press.
- Hyun, I. ve Angeles, A. D. L. (2019). *Chimera Research: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology* (I. H. Angeles ve A. De Los (eds.); Vol. 2005, Issue Chapter 14). Humana Press.
- İplik, E. S. ve Çakmaköğlü, B. (2020). Hücre Kültürü Temel Teknikleri. *ÜCD Güncelleme Serileri, “Moleküler Tıp” Özel Sayısı*, 9(2), 21–24.
- Kotarbinski, T. (2014). Hematopoietic Cancers. In T. W. Mak, M. E. Saunders ve B. D. Jett (Eds.), *Primer to the Immune Response* (2., pp. 553–585). Elsevier Inc.
- Meleady, P. ve O’Connor, R. (2006). General procedures for cell culture. In J. E. Celis, T. Hunter, N. Carter, D. Shotton, J. V. Small ve K. Simons (Eds.), *Cell Biology, Four-Volume Set* (3., Vol. 1, pp. 13–20). Academic Press.
- Mitry, R. R. ve Hughes, R. D. (2013). *Human Cell Culture Protocols* (J. M. Walker (ed.); 3.). Humana Press.
- Ozturk, S. S. ve Hu, W. (2006). *Cell Culture Technology for Pharmaceutical and Cell-Based Therapies*. Taylor ve Francis.
- Terzioğlu, G., Keskin, A. Ü. ve Demirel, G. Y. (2013). Hücre Proliferasyonu Ölçüm Yöntemleri ve Çeşitli Ticari Proliferasyon Kitlerinin Karşılaştırılması. *Turkish Journal of Immunology*, 1(3), 74–89.
- Yang, H., Wang, F., Liu, X., Wang, H. ve Qu, T. (2020). Mesenchymal stem cells from human umbilical cord regulate the expression of major histocompatibility complex in human neural stem cells and their lineages. *Neuroscience Letters*, 738, 135359.
- Yazır, Y. ve Dalçık, H. (2012). Vasküler Patolojilerin Araştırılmasında Önemli Bir Araç: Endotel Hücre Kültürü. *Kosuyolu Kalp Dergisi*, 15(3), 137–142.

Bölüm 7

KENTSEL ATIK SULARDAKİ UYUŞTURUCU MADDELERİN EPİDEMİYOLOJİK ÇALIŞMALARDA KULLANIMI VE UZAKLAŞTIRILMASI

*Elif ÖZTEKİN¹
Sinem ÇOLAK²*

1 Arş. Gör. Dr. Elif ÖZTEKİN, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Zonguldak Türkiye, elif.alaydin@beun.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-7861-7041

2 Öğr. Gör. Dr. Sinem ÇOLAK, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Çaycuma Gıda ve Tarım MYO, Kimya ve Kimyasal İşleme Bölümü, Kimya Teknolojisi Programı, Zonguldak Türkiye, sinem.colak@beun.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-6731-327X

1.GİRİŞ

Son yıllarda, özellikle ABD’de hem yasal hem de yasa dışı uyuşturucuların kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Rapor edilen aşırı doz vakalarının sayısındaki artış sağlık hizmeti sektörü ve politikacılar için ciddi bir endişe kaynağı oluşturmaktadır. Epidemiyolojik çalışmalarda kullanılan anketler, uyuşturucuların halk tarafından ne kadar ve ne ölçüde tüketildiğine dair büyük bilgiler sağlasa da, bu rakamlar tamamen doğru olmayabilir, çünkü bunlar sadece anketi uygulayanın ulaşabildiği hedef kitle ile sınırlı kalmaktadır. Ek olarak, veri toplama yöntemleri genellikle toplumdan ayrılmış kişileri, örneğin evsizleri ve sapkın bireyleri hariç tutar (Daghir ve Markuszewski, 2010). Bu durum da gerçek sayıları daha da gizler. Klasik anketin dezavantaj sağlayan bir diğer önemli sınırlaması, veri toplama ile sonuçların değerlendirilmesi arasında geçen uzun zamandır.

Son birkaç yılda yasadışı uyuşturucular yeni bir çevresel kirlenici olarak keşfedilmiş ve analitik kimya, ziraat, çevre kimyası gibi çeşitli bilim dallarının ilgisini çekmiştir (Yazıcı ve Yılmaz, 2020; Yazıcı ve Yılmaz, 2021; Yazıcı, 2020a). Çevre kirliliğine sebep olan yasadışı uyuşturucuların temel kaynağı ise insan tüketimidir. Alınan ilaca ait an a bileşenler tüketim sonucunda insan idrarı ile dışarı atılır, kanalizasyon sistemine karışarak, kentsel arıtma sistemlerine ulaşır. (Richardson, 2009; Zuccato ve Castiglioni, 2009). 2001 yılında Daughton tarafından ilk kez, arıtma tesislerinden alınan kanalizasyon numunelerinin yasadışı uyuşturucu kullanımını belirlemek için yararlı bir araç olabileceğini öne sürülmüştür (Daughton, 2002). Atıksu epidemiyolojisi olarak adlandırılan bu yöntem, ilaç kalıntılarının insanlar tarafından önemli miktarlarda atılması ve atık sularda yeterince kararlı olması durumunda, nüfusun tükettiği miktarları yansıtacak şekilde kentsel arıtılmamış atık sularda kolayca tespit edilebilmesi ilkesine dayanmaktadır (Castiglioni ve ark. 2011). O zamandan beri atık su bazlı epidemiyoloji (wastewater-based epidemiology, WBE) alanındaki yayınların sayısı artmaktadır. WBE en çok Avrupa ülkelerinde (Castiglioni ve ark. 2014; Löve ve ark. 2018; Emke ve ark. 2018; Cosenza ve ark. 2018) popüler olmuştur, ancak uygulamaları Çin (Wang ve ark. 2018), Kolombiya (Bijlsma ve ark. 2016), Güney Afrika (Archer ve ark. 2018), Kamerun (Mayoudom ve ark. 2018) ve Avustralya (Bruno ve ark. 2018) gibi dünyanın diğer bölgelerine yayılmıştır. Türkiye’de ise Adana (Daglioglu ve ark. 2019) ve İstanbul (Mercan ve ark. 2019) illerinde çalışmalar yapılmıştır.

Avrupa Birliği (Avrupa Uyuşturucu ve Uyuşturucu Bağımlılığı İzleme Merkezi, EMCDDA) ve Avustralya Hükümeti, disiplinler arası atık su uyuşturucu izleme programları yürütmekte ve atık su analizine dayalı olarak kendi coğrafi bölgelerinde uyuşturucu kullanımına ilişkin resmi raporlar yayınlamaktadır. Atıksu bazlı epidemiyolojik çalışmalar gele-

neksel tekniklerin boşluklarını doldurabilir ve tamamlayıcı bir araç olarak kullanılabilir. Genel nüfus anketleri, uzun değerlendirme süreçleri ve olası yanıltıcı cevaplar (tutuklanma korkusu ve tüketilen maddelerle ilgili hatalı veya eksik bilgi gibi faktörler nedeniyle) nedeniyle bazı dezavantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, atıksu bazlı epidemiyolojik çalışmalar, değerlendirmeyi yanlış yönlendirebilecek tüm insan sorgulama veya anket faktörlerinden bağımsızdır ve yalnızca atık sulara analitik tekniklerle bulunan atılım kalıntılarına (metabolitler) ve ana ilaçlara dayanır.

Atıksu bazlı epidemiyolojik çalışmalar, kısa sürede değerlendirme yapabilme yeteneği, trendlerin değişmeden önce izlenmesine ve gerekli aksiyonların daha hızlı hayata geçirilmesine olanak tanır. Bu nedenle, Atıksu bazlı epidemiyolojik çalışmalar hızla yasadışı uyuşturucu tüketiminin önemli bir destekleyici göstergesi haline geliyor (EMCDDA, 2018a; EMCDDA, 2018b).

2. YASA DIŞI UYUŞTURUCULARIN SULARDAKİ ETKİSİ

Yasadışı ilaçlar, doğal su ortamına girdiklerinde suda yaşayan organizma ve insan sağlığı için potansiyel risk oluşturabilir (Li ve ark. 2014; Du ve ark. 2015). Tükettiğimiz ilaçların çoğu atık sulara karışmaktadır ancak mevcut atık su arıtma tesislerinin büyük bir kısmı bu maddeleri uzaklaştırmak için gerekli donanımına sahip değildir. Atıksu arıtma tesislerinden çıkan atıklar, yüzey sularındaki yasadışı uyuşturucuların başlıca kaynağıdır (Chiaia ve ark. 2008). Yasadışı uyuşturucu kullanımı, büyüyen bir küresel sağlık sorunudur ve bu insani salgının toplumsal maliyetlerinin altında potansiyel bir ekolojik kriz de gizlidir.

Prozac olarak da bilinen fluoksetin gibi ilaçlar, sulara sızarak balıklara ulaşabilir ve onların davranışlarını değiştirebilir. Ancak ilaç kirliliği reçete edilen ilaçlarla bitmez, metamfetamin gibi yasa dışı uyuşturucular da sulara birikebilir. Özellikle tatlı su akıntılarında metamfetamin seviyeleri arttıkça, balıkların giderek daha fazla bağımlı hale geldiği görülmüştür.

Yüzey sularında yasa dışı uyuşturucu maddelerin balık davranışlarına etkisi bilinmediğinden, Çek Cumhuriyeti Prag Yaşam Bilimleri Üniversitesi'nden Pavel Horký ve ekibi tarafından kahverengi alabalığın (*Salmo trutta*) sulara bulunan yasadışı metamfetamin bağımlılığı riski altında olup olmadığı araştırılmıştır. Bu gizli ekolojik salgının olası olumsuz etkilerini tespit etmek için deney düzeneği kurulmuştur. Deneysel çalışmada 120 kuluçkalık kahverengi alabalık (*Salmo trutta*) ve 350 litrelik iki tank kullanılmıştır. Birinci tankta bulunan su, doğal yaban hayatındaki tatlı su nehirlerinde ölçülen konsantrasyonlarla (1µg/L) metamfetamin içermiş, diğeri ise kontrol grubu ile karşılaştırılması için sadece doğal nehir suyu ile doldurulmuştur. Sekiz hafta sonra, metamfetamini deney tankından uzaklaştırılmıştır. Sonraki 10 günlük "çekilme" döneminde her

iki gruptan rastgele seçilen balıklar bağımlılık ve yoksunluk belirtileri açısından test edilmiştir. Bunun için balıkların seçimleri takip edilmiş ve kontrol balıklarının metamfetamin içeren suyu tercih etmediği buna karşın metamfetamin bulunan suda 2 ay geçiren alabalıkların bağımlı hale geldiği ve metamfetamin içeren suyu tercih ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca, bağımlı balıkların, kontrol grubu olarak belirlenen hiç ilaç almamış alabalıklardan daha az aktif olduğu görülmüştür. Tanktan metamfetamin uzaklaştırılmasından 10 gün sonrasına kadar ise beyinlerinde ilaca dair izlere rastlanmıştır. Balıklarda ortaya çıkan bağımlılık çözüm bulunmaz ise hayatta kalma sürelerini etkileyebilir ve üremelerine zarar verebilir. Çalışmada sularda düşük konsantrasyonlarda bulunan yasa dışı uyuşturucuların o sularda yaşayan alabalıkları etkileyebileceği net olarak görülmüştür (Horký ve ark. 2021).

3. ATIKSULARDA UYUŞTURUCU MADDELERİN ANALİZ YÖNTEMLERİ

Literatürde pek çok klasik uyuşturucu madde (marihuana, kokain ve amfetamin vb.) ve metabolitleri için analitik yöntemler mevcuttur (van Nuijs ve ark. 2011). Ancak atık sularda analize etki eden bazı faktörler bulunmaktadır ve aşağıda verilmiştir (McCall ve ark. 2016);

- İlaçların atık sudaki değişimi (stabilite, bozunma, parçalanma ve sorpsiyon miktarları)
- İnsan metabolitlerinin durumu
- Atık su sisteminin özellikleri (nüfus, atık su akış hızı)
- Dış parametreler (iklim koşulları gibi)

Atıksu arıtma tesislerine giriş sularındaki yapılan analizler ile toplumdaki yasadışı uyuşturucu kullanımı hakkında bilgi toplanabilirken, arıtma tesisi çıkış sularında yapılacak analizler ile de yasadışı ilaçların atıksulardan giderim verimi veya ortamda kalma miktarı belirlenebilmektedir (van Nuijs ve ark. 2011). Atık su analizindeki başlıca zorluk, farklı kimyasal özelliklere sahip (bazik ve asidik, hidrofilik ve lipofilik) analitleri içeren örnekler için çoklu analit yöntemlerinin geliştirilmesi olmuştur. Örneğin; esrarın aktif bileşiği d-9-tetrahidrokanabinol (THC) ve karboksilik asit metaboliti 11-nor-9-karboksi-tetrahidrokanabinol (THCCOOH), asidik ve lipofilik özelliklerinden dolayı özellikle zordur (Bijlsma ve ark. 2009; Boleda ve ark. 2007; Postigo ve ark. 2008; Tschärke ve ark. 2016). Bu nedenle esrar bazı çalışmalara dahil edilememiştir (Löve ve ark. 2018).

Atık sulardan yasa dışı uyuşturucu maddelerin ekstraksiyonu için çoğunlukla katı faz ekstraksiyon (SPE) tekniği uygulanmıştır. SPE prosedüründe şatrlandırma çözeltisi olarak çoğunlukla metanol ve su kullanılmış-

tır. Genellikle ektraktlar azot gazı altında kuruluğa kadar uçurulmuş ve tortu metanol içinde yeniden çözündürülerek -20 °C'de bir ay boyunca muhafaza edilebilmiştir. Analitlerin ayrılması genellikle sıvı kromatografisi (LC) ile gerçekleştirilmiş kantitatif tayin için ise kütle spektrometresi (MS) kullanılmıştır. Kütle spektrometresinde iyonlaştırıcı olarak elektrosprey iyonizasyonun (ESI) pozitif modu seçilmiştir. Kullanılan analitik yöntemler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Uyuşturucu maddelerin ekstraksiyon ve analizi için uygulanan yöntemler.

	SPE kartuşları	Şartlandırma Çözücüleri	Elüsyon Çözücüleri	Analiz
Adana (Daglioglu ve ark.2019)	Oasis HLB (6 cc, 500 mg)	6 mL metanol 6 mL ultra saf su	8 mL metanol	LC/MS/MS ESI+
İstanbul (Mercan ve ark.2019)	Oasis HLB cartridges (60 mg,3 mL)	2 mL Etil Asetat, 2 mL metanol 2 mL ultra saf su	2 mL Etil Asetat, 2 mL metanol	LC/MS/MS ESI+
Norveç, İzlanda, Finlandiya, İsveç ve Faroe Adaları (Löve ve ark. 2018)	Oasis HLB µElution plates, 30 µm 96 well plate	1 mL metanol 1 mL ultra saf su	Metanol içinde 50 uL %1 NH4OH, metanol içinde 50 uL %1 FA, 100 uL MeOH	UHPLC/MS/MS ESI+
New York (Centazzo ve ark. 2019)	Strata-X-C 33 mm 200 mg/6mL	6mL metanol, 6mL su 6mL %0,1 HCl içeren su	8mL DCM:izopropanol:amonyum hidroksit (v/v/v 78:20:2)	UHPLC/MS/MS ESI
Portekiz (Lopes ve ark. 2014)	Oasis HLB (6 mL, 500 mg)	3 mL metanol 3 mL ultra saf su	2x4mL metanol	LC/MS/MS ESI+
Çin(Deng ve ark. 2020)	Oasis MCX (60 mg, 3 cc)	5 mL metanol 5 mL ultra saf su	6 mL asetonitril içinde 5% amonyak-su	UPLC/MS/MS ESI+

Atık sularda uyuşturucu madde analizi yapan ülkelerin inceledikleri analitler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Ülkelerin atık su örneklerinde tayini yaptıkları uyuşturucu maddeler:

Ülke	Analitler
İtalya (Cosenza ve ark. 2018)	Metamfetamin, kokain (COC), 3,4-metilendioksimetamfetamin (MDMA), metadon (METH), 2-etiliden-1,5-dimetil-3,3-difenilpirolidin (EDDP), 3,4-metilendioksi amfetamin (MDA); 3,4-metilendioksi etilamfetamin (MDEA), 11-nor-9-karboksi-D9 tetrahidrokanabinol (THC-COOH) ve Benzoilekgonin (BEG).
Norveç, İzlanda, Finlandiya, İsveç ve Faroe Adaları (Löve ve ark. 2018)	Amfetamin, metamfetamin, MDMA ve kokain
New York (Centazzo ve ark. 2019)	Nikotin (kötinin), kokain (benzoilekgonin, kokaetilen ve kokain), amfetaminler (amfetamin, metamfetamin, 3,4-metilendioksiamfetamin ve 3,4-metilendioksimetamfetamin), opioidlerin (6-monoasetilmorfin, morfin, kodein, oksimorfon, oksikodon, hidromorfon, hidrokodon) eşzamanlı analizi için yöntem ,fentanil, norfentanil, metadon ve 2-etiliden-1,5-dimetil-3,3-difenilpirolidin) ve kenevir belirteçleri (δ -9-tetrahidrokanabinol ve 11-nor-9-karboksi-tetrahidrokanabinol)
Çin (Deng ve ark. 2020)	Metamfetamin (METH), kokain (COC), 3,4 metilendioksimetamfetamin (MDMA), benzoilekgonin (BE), amfetamin (AMP), metadon (MET), norketamin (NK), kodein (COD), ketamin (KET), 3,4-metilendioksiamfetamin (MDA), metkatinon (MC), eroin (HR)
Portekiz (Lopes ve ark. 2014)	Kokain (COC), benzoilekgonin (BE) ve kötinin (CT)
Kolombiya (Bijlsma ve ark. 2016)	Kokain, esrar, amfetamin, metamfetamin, MDMA (ecstasy), eroin ve ketamin.
Güney Afrika (Archer ve ark. 2018)	Kokain, metamfetamin, MDMA ve eroin, yeni psikoaktif madde (NPS) mefedron
Türkiye (Adana) (Daglioglu ve ark.2019)	Kokain ve ana metaboliti, benzoilekgonin, amfetamin, metamfetamin, 3,4 metilendioksimetamfetamin (MDMA), 3,4-metilendioksiamfetamin (MDA) ve 3,4 metilendioksietamfetamin (MDEA), morfin, kodein, eroin metaboliti 6-asetilmorfin (6-MAM), esrar metaboliti, 11-nor-karboksi-THC (THC-COOH) ve D9-tetrahidrokanabinolün (THC) ana metaboliti, 11-hidroksi dahil opiyatlar (THC-OH)
Türkiye (İstanbul) (Mercan ve ark. 2019)	Amfetamin (AMP), metamfetamin (METH), 3,4-metilendioksimetamfetamin (MDMA), kokain (COC) (benzoilekgoninden) ve esrar (THCCOOH'den)

4. ATIKSU BAZLI TOPLULUK UYUŞTURUCU KULLANIMI-NIN HESAPLANMASI

Atık su içinde belirlenen analit konsantrasyonlarını topluluk kullanımı tahminlerine dönüştürmek için farklı uygulamalar yapılmıştır. Genel-

likle her bileşik için konsantrasyonları, düzeltme faktörü ile çarpılmıştır. Uyarıcılar (kokain, amfetamin, metamfetamin, MDMA), opioidler (kodein, morfin, eroin, fentanil ve metadon), esrar ve nikotin için bu faktörler mevcut literatüre dayanmaktadır (Tscharke ve ark. 2016; Causanilles ve ark. 2017; Jacox ve ark. 2017; Castiglioni ve ark. 2015).

Ayrıca her bir ilacın toplam miktarı (1000 kişi başına mg/gün), ana ilacın ve/veya metabolitin akan atık sudaki konsantrasyonu ve arıtma tesislerindeki ana ilacın ve/veya metabolitin günlük akış hızı kullanılarak geri hesaplamaların yapıldığı uygulamalar da mevcuttur. Bu geriye dönük hesaplamalar için ihtiyaç duyulan parametreler; tüketim göstergeleri, atılım oranları, düzeltme faktörleri ve ortalama ilaç dozudur. Hesaplamalar için atıksu arıtma tesis girişlerindeki ilaç veya metabolitlerin konsantrasyonları (ng/L), suyunun günlük akış hızı (L/gün) ve düzeltme faktörleri kullanılmıştır. Tedavi için kullanılan günlük morfin miktarı (terapötik morfin (g/gün)) eroin geri hesaplamaları için gereklidir. Çünkü bu miktar eroin hesaplamalarından çıkarılmalıdır. Aşağıda kokain, amfetamin, metamfetamin, MDMA, eroin ve THC için kullanılan geri hesaplama denklemleri verilmiştir (Daglioglu ve ark.2019):

Kokain (g/gün) = benzoilekgonin konsantrasyonu (ng/L) * akış hızı (L/gün) * 2,33

Amfetamin (g/gün) = amfetamin konsantrasyonu (ng/L) * akış hızı (L/gün)* 3,3

Metamfetamin (g/gün) = metamfetamin konsantrasyonu (ng/L) * akış hızı (L/gün) * 2,3

MDMA (ecstasy) (g/gün) = MDMA konsantrasyonu (ng/L) * akış hızı (L/gün) * 1,5

Eroin (g/gün) = ((morfin konsantrasyonu (ng/L) * akış hızı (L/gün)) terapötik morfin (g/gün)) * 3,04

THC (marihuana) (g/gün) = THC-COOH konsantrasyonu (ng/L)* akışı oran (L/gün) * 100

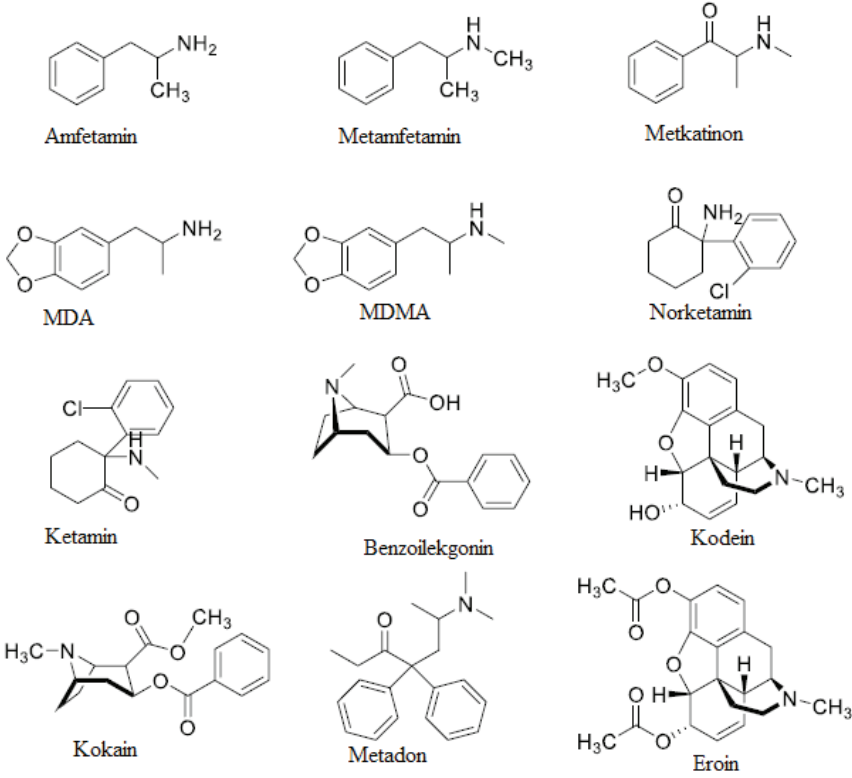
Çin'de yapılan çalışmada ise her bir bileşiğin belirli bir atıksu arıtma tesisinde günlük kütle yükü aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır (Deng ve ark. 2020):

Bir kimyasal kalıntının etkin yükü: mg/(1000 x gün)= Yasadışı uyuşturucu konsantrasyonu [(ng/mL) x akış (L/gün) / (hizmet verilen popülasyon/1000)]x10⁻⁶

5. ATIKSULARDAN UYUŞTURUCU MADDELERİN UZAKLAŞTIRILMASI

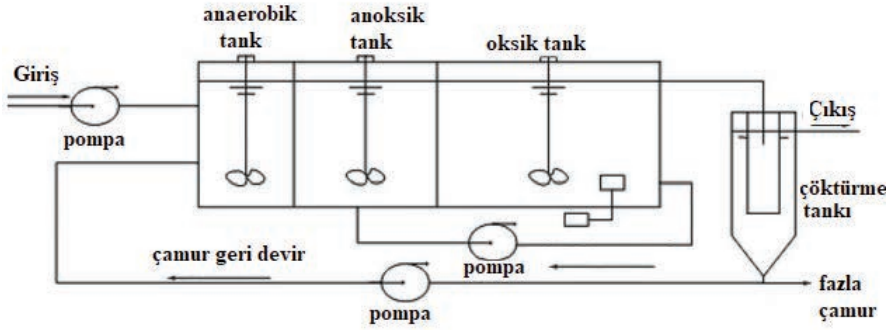
Atıksu arıtma tesislerinin dizaynı ve işletilmesi atıksuyun özelliklerine göre değişim göstermektedir. Yasadışı uyuşturucu içeren atıksuların arıtılması da gerekli işletim koşullarının sağlanması ile mümkündür. Atıksu arıtma tesislerinde arıtma verimini arttırmak için aktif çamur arıtma, damlatmalı filtreler veya membran biyoreaktörler gibi konfigürasyonlar, ikincil arıtma prosesleri olarak kullanılabilir (Yadav ve ark. 2017). Son yıllarda yapılan çalışmalar aktif çamur proseslerinin yasadışı ilaçların gideriminde daha etkili olduğu konusunu tartışmaktadır (Kasprzyk-Hordern ve ark. 2009; Baker ve Kasprzyk-hordern, 2013). Baker ve Kasprzyk-hordern (2013) yaptıkları çalışmada çeşitli yasadışı ilaçların arıtımında aktif çamur ve damlatmalı filtre proseslerinin giderim verimlerini karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre aktif çamur proseslerinde %91 kokain, %99 AMP, %39 METH giderim verimleri elde edilirken, damlatmalı filtre kullanıldığında ise aynı maddelerdeki giderim verimleri sırası ile %37, %89 ve %25 olarak elde edilmiştir. Bijlsma ve ark. (2012)'de yaptıkları çalışmada atıksu arıtımında kullandıkları aktif çamur prosesi ile %100 AMP ve METH giderimi, %79 kokain giderimi elde etmişlerdir. Yasadışı uyuşturucuların uzaklaştırılması için uygulanan prosedürler, arıtma tesislerinden çıkan sulardaki yapısına göre değişmektedir. Örneğin, amfetamin ve kokainin uzaklaştırılma oranı %90'ın üzerindeyken, 3,4-metilendioksümetamfetamin (MDMA) veya metamfetaminin (METH) uzaklaştırma verimliliği %50'nin altında bildirilmiştir (Kasprzyk-Hordern ve ark. 2008; Boleda ve ark. 2009; Chiavola ve ark. 2019; Boni ve ark. 2018) Yasadışı uyuşturucuların çoğu geleneksel atık su arıtma tesislerinde tamamen giderilememektedir ve çok sayıda yasadışı uyuşturucu, deşarj edilen atık su ile yüzey suyuna, yeraltı suyuna ve içme suyu kaynaklarına karışabilmiştir (Daughton, 2001)

Doğu Çin'in Changzhou şehrinde farklı arıtma teknikleri kullanan sekiz Atıksu arıtma tesisinin hem giriş hem de çıkış suyunda tespit edilen ve uzaklaştırılması için yöntem geliştirilen 12 yasadışı uyuşturucu Şekil 1'de verilmiştir (Deng ve ark. 2020).

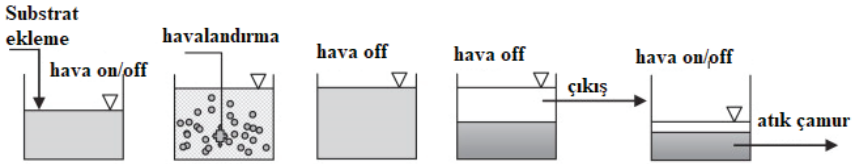


Şekil 1. Arıtma tesisinden uzaklaştırılması için çalışılan yasadışı uyuşturuların yapısı ve metabolitleri (Deng ve ark. 2020).

Hedef analitlerin uzaklaştırma verimliliği, büyük ölçüde atık su arıtma tekniklerine bağlıdır. Çin’de yapılan çalışmada, sekiz atıksu arıtma tesisinin arıtma teknikleri; anaerobik anoksik oksit (AA/O) prosesi, anoksik oksit (A/O) prosesi ve ardışık kesikli reaktör aktif çamur (SBR) prosesi olarak bildirilmiştir. Bu nedenle SBR, yasadışı uyuşturucuların ortadan kaldırılmasında daha etkiliyken, A2/O ve A/O süreçleri esas olarak organik N ve P’yi uzaklaştırmak için kullanılmıştır. SBR süreci, toplam 12 hedef ilaç için %79’luk en yüksek uzaklaştırma oranıyla yasa dışı ilaçları sudan etkili bir şekilde çıkarmayı başarmış ve bunu A2/O süreci (%73) izlemiştir. SBR sürecinde, yasadışı uyuşturucular ilk olarak birincil çökeltme tankında elimine edilmiştir. Biyokütlenin SBR işlemindeki aktivitesi, organik kirleticilerin ayrışmasını hızlandırmış ve bu da %70’in üzerinde giderim verimliliği ile sonuçlanmıştır (Deng ve ark. 2020). Anaerobik-anoksik-oksik (AAO) aktif çamur sisteminin şematik diyagramı Şekil 2’de ve SBR prosesinin işlem basamakları Şekil 3’te gösterilmiştir (Zeng ve ark. 2013; Ghangrekar ve Behera, 2014).



Şekil 2. Anaerobik-anoksik-oksik (AAO) aktif çamur sisteminin şematik diyagramı (Zeng ve ark. 2013).



Adım 1: Dolum Adım 2: Reaksiyon Adım 3: Çöktürme Adım 4: Boşaltma Adım 5: Dinlendirme

Şekil 3. SBR proses döngüsündeki ana adımlar (Ghangrekar ve Behera, 2014).

SBR işleminin avantajları;

- Hızlı çökeltme hızı
- Yüksek reaksiyon hızı
- Refrakter organikler için iyi bozunma performansı olarak sıralanmıştır (Deng ve ark. 2020).

Araştırılan yasa dışı uyuşturucuların ve metabolitlerinin çoğu hidrofildir, bu nedenle ağırlıklı olarak çözünmüş sulu fazda bulunmaları ve katı partiküller üzerinde zayıf bir şekilde adsorbe olmaları beklenir. Bununla birlikte, amfetamin (AMP) ve metamfetamin (METH) biyolojik bozulmaya karşı oldukça dirençli olduğundan atık sudan sorpsiyon ile uzaklaştırılmıştır (Fernandez-Fontaina ve ark. 2012; Hörsing ve ark. 2012; Álvarez-Ruiz ve ark. 2015). Bazı yasa dışı uyuşturucuların negatif olarak uzaklaştırılması da atıksu arıtma tesislerinde gözlenmiş ve en yüksek negatif uzaklaştırma oranları metkatinon (MC) ve 3,4-metilendioksiamfetamin (MDA) sırasıyla -%155,9 ve -%60,7'ye kadar çıktığı görülmüştür. Ketamin için de negatif uzaklaştırma bildirilmiştir. Çalışmada metamfetamin, metadon ve MDA, atıksu arıtma tesislerinde etkin bir şekilde uzaklaştırılmış ve uzaklaştırma oranları %51,3 ve %100 arasında bildirilmiştir. Changzhou şehrindeki 8 atık su arıtma tesisinden alınan örneklerdeki 12 yasadışı uyuşturucu ve metabolitleri arasında; METH, AMP, KET, MDMA ve MET, en yüksek konsantrasyonlarla baskın ilaçlar olarak

bildirilmiştir. Uzaklaştırma tekniklerinden SBR işlemleri yasadışı uyuşturucuların uzaklaştırılmasında etkili olurken, A/O işlemleri ile hedef ilaçların uzaklaştırılmasında etkinliği düşük bulunmuştur (Deng ve ark. 2020).

6. YORUM

Yapılan literatür incelemelerinde, atıksulardaki uyuşturucu miktarının belirlenmesinde özellikle ülkemizde yeterli çalışma olmadığı görülmüştür. Ancak kentsel atıksulardaki yasadışı uyuşturucuların miktarının belirlenmesi, ülkelerin bu maddelere olan bağımlılıkla mücadelesinde önemli bir adım olacaktır. Buna ek olarak yasadışı uyuşturucu maddelerin atıksu arıtma tesislerinde tespiti ile gerekli kontrol adımlarının sağlanması, atıksu kalitesini etkileyerek alıcı suların ve canlı yaşamının korunmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Álvarez-Ruiz, R., Andrés-Costa, M. J., Andreu, V., Picó, Y. (2015). Simultaneous determination of traditional and emerging illicit drugs in sediments. *Journal of Chromatography A*, 1405: 103-115.
- Archer, E., Castrignano, E., Kasprzyk-Hordern, B. et al. (2018). Wastewater-based epidemiology and enantiomeric profiling for drugs of abuse in South African wastewaters. *Sci Total Environ*. 625: 792–800.
- Australian Criminal Intelligence Commission. National wastewater drug monitoring program. 2017. Available from: https://www.acic.gov.au/sites/g/files/net1491/f/national_wastewater_drug_monitoring_program_report_1_0.pdf?v¼1490333695
- Baker, D.R., Kasprzyk-hordern, B., (2013). Spatial and temporal occurrence of pharmaceuticals and illicit drugs in the aqueous environment and during wastewater treatment: new developments. *Sci. Total Environ*. 454-455:442-456.
- Bijlsma, L., Sancho, J.V., Pitarch, E., et al. (2009). Simultaneous ultra-high-pressure liquid chromatography- tandem mass spectrometry determination of amphetamine and amphetamine-like stimulants, cocaine and its metabolites, and a cannabis metabolite in surface water and urban wastewater. *J Chromatogr A*. 1216:3078–3089.
- Bijlsma, L., Emke, E., Hernandez, F., et al. (2012). Investigation of drugs of abuse and relevant metabolites in Dutch sewage water by liquid chromatography coupled to high resolution mass spectrometry. *Chemosphere*. 89:1399-1406.
- Bijlsma, L., Botero-Coy, A.M., Rincon, R. J. et al. (2016). Estimation of illicit drug use in the main cities of Colombia by means of urban wastewater analysis. *Sci Total Environ*. 565:984–993.
- Boleda, M. R., Galceran, M.T., Ventura, F. (2007). Trace determination of cannabinoids and opiates in wastewater and surface waters by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *J Chromatogr A*. 1175:38–48.
- Boleda, M.R., Galceran, M.T., Ventura, F. (2009). Monitoring of opiates, cannabinoids and their metabolites in wastewater, surface water and finished water in Catalonia, Spain. *Water Res* 43(4):1126–1136.
- Boni, M.R., Chiavola, A., Di Marcantonio, C., Sbaffoni, S., Biagioli, S., Cecchini, G., Frugis, A. (2018). A study through batch tests on the analytical determination and the fate and removal of methamphetamine in the biological treatment of domestic wastewater. *Environ Sci Pollut Res* 25(28):27756–27767.
- Bruno, R., Edirisinghe, M., Hall, W. et al. (2018). Association between purity of drug seizures and illicit drug loads measured in wastewater in a South

- East Queensland catchment over a six year period. *Sci Total Environ.* 635:779–783.
- Castiglioni, S., Bagnati, R., Melis, M. et al (2011). Identification of cocaine and its metabolites in urban wastewater and comparison with the human excretion profile in urine. *Water Research.* 45(16): 5141-5150.
- Castiglioni, S., Thomas, K. V., Kasprzyk-Hordern, B., et al.(2014). Testing wastewater to detect illicit drugs: state of the art, potential and research needs. *Sci Total Environ.* 487:613–620.
- Castiglioni, S., Senta, I., Borsotti, A. et al. (2015). A novel approach for monitoring tobacco use in local communities by wastewater analysis. *Tob Control.* 24:38–42.
- Causanilles, A., Baz-Lomba, J.A., Burgard, D.A. et al. (2017). Improving wastewater-based epidemiology to estimate cannabis use: focus on the initial aspects of the analytical procedure. *Anal Chim Acta.* 988:27–33.
- Centazzo, N., Frederick, B. M., Jacox, A., Cheng, S-Y., Concheiro-Guisan, M. (2019). Wastewater analysis for nicotine, cocaine, amphetamines, opioids and cannabis in New York City. *Forensic Sciences Research* 4(2):152–167.
- Chiaia, A.C., Banta-Green, C., Field, J. (2008). Eliminating solid phase extraction with large-volume injection LC/MS/MS: analysis of illicit and legal drugs and human urine indicators in US wastewaters. *Environ Sci Technol* 42(23):8841–8848.
- Chiavola, A., Tedesco, P., Boni, M.R. (2019). Fate of selected drugs in the wastewater treatment plants (WWTPs) for domestic sewage. *Environ Sci Pollut Res* 26(2):1113–1123.
- Cosenza, A., Maida, C. M., Piscionieri, D. et al. (2018). Occurrence of illicit drugs in two wastewater treatment plants in the South of Italy. *Chemosphere.* 198:377–385.
- Daghir, E., Markuszewski, M. J., (2010). Disposition of drugs of abuse and their metabolites in wastewater as a method of the estimation of drug consumption. *Curr Drug Metab.* 11:629–638.
- Daglioglu, N., Guzel, E. Y., Kilercioglu, S. (2019). Assessment of illicit drugs in wastewater and estimation of drugs of abuse in Adana Province, Turkey. *Forensic Sci Int.* 294:132–139.
- Daughton, C. G. (2001). Illicit drugs in municipal sewage. *ACS Symp Ser* 791:348–364.
- Daughton, C. G. (2002). Environmental stewardship and drugs as pollutants. *Lancet.* 360:1035–1036.
- Deng, Y., Guo, C., Zhang, H., Yin, X., Chen, L., Wu, D., Xu, J. (2020). Occurrence and removal of illicit drugs in different wastewater treatment plants with different treatment techniques. *Environ Sci Eur.* 32:28.

- Du, P., Li, K., Li, J., Xu, Z.Q., Fu, X.F., Yang, J., Zhang, H.F., Li, X.Q. (2015). Methamphetamine and ketamine use in major Chinese cities, a nationwide reconnaissance through sewage-based epidemiology. *Water Res* 84:76–84.
- EMCDDA (2018b.) European Drug Report 2018: Trends and Developments, Lisbon.
- EMCDDA (2019). Wastewater analysis and drugs: a European multi-city study. Lisbon (Portugal): EMCDDA; 2019. Available from: http://www.emcdda.europa.eu/system/files/publications/2757/POD_Wastewater%20analysis_update2019.pdf
- EMCDDA (European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction) (2018a.) Wastewater Analysis and Drugs - A European Multi-city Study, Perspectives on Drugs, Lisbon.
- Emke, E., Vughs, D., Kolkman, A. et al. (2018). Wastewaterbased epidemiology generated forensic information: amphetamine synthesis waste and its impact on a small sewage treatment plant. *Forensic Sci Int.* 286: e1–e7.
- Fernandez-Fontaina, E., Omil, F., Lema, J. M, Carballa, M. (2012). Influence of nitrifying conditions on the biodegradation and sorption of emerging micropollutants. *Water Res*, 46:5434–5444.
- Ghangrekar, M.M. and Behera M. (2014). Wastewater Treatment and Reuse. Comprehensive. *Water Quality and Purification*.
- Horký, P., Grabic, R., Grabicová, K., Brooks, B. W., Douda, K., Slavík, O., Hubená, P., Sancho Santos, E. M. and Randák, T. (2021). Methamphetamine pollution elicits addiction in wild fish. *J. Exp. Biol.* 224.
- Hörsing, M., Kosjek, T., Andersen, H. R., Heath, E., Ledin, A. (2012). Fate of citalopram during water treatment with O₃, ClO₂, UV and Fenton oxidation. *Chemosphere*, 89(2):129–135.
- Jacox, A., Wetzel, J., Cheng, S-Y. et al. (2017). Quantitative analysis of opioids and cannabinoids in wastewater samples. *Forensic Sci Res.* 2:18–25.
- Kasprzyk-Hordern, B., Dinsdale, R.M., Guwy, A.J. (2008). Multiresidue methods for the analysis of pharmaceuticals, personal care products and illicit drugs in surface water and wastewater by solid-phase extraction and ultra performance liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry. *Anal Bioanal Chem* 391(4):1293–1308.
- Kasprzyk-Hordern, B., Dinsdale, R.M., Guwy, A.J., (2009). The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters. *Water Res.* 43:363-380.
- Li, J., Hou, L., Du, P., Yang, J., Li, K.Y., Xu, Z.Q., Wang, C.C., Zhang, H.F., Li, X.Q. (2014). Estimation of amphetamine and methamphetamine uses in Beijing through sewage-based analysis. *Sci Total Environ* 490:724–732.

- Lopes, A., Silva, N., Bronze, M. R., Ferreira, J., Morais, J. (2014). Analysis of cocaine and nicotine metabolites in wastewater by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. Cross abuse index patterns on a major community. *Sci Total Environ.* 487:673-80.
- Löve, A.S.C., Baz-Lomba, J.A., Reid, M.J., et al. (2018) Analysis of stimulant drugs in the wastewater of five Nordic capitals. *Sci Total Environ.* 627: 1039–1047.
- Mayoudom, E.V.T., Nguidjoe, E., Mballa, R.N. et al. (2018). Identification and quantification of 19 pharmaceutical active compounds and metabolites in hospital wastewater in Cameroon using LC/QQQ and LC/Q-TOF. *Environ Monit Assess.* 190:723.
- McCall, A-K., Bade, R. Kinyua, J., Lai, F.Y., et al. (2016). Critical review on the stability of illicit drugs in sewers and wastewater samples. *Water Res.* 88:933–947.
- Mercan, S., Kuloglu, M., Tekin, T. et al. (2019). Wastewaterbased monitoring of illicit drug consumption in Istanbul: preliminary results from two districts. *Sci Total Environ.* 656:231–238.
- Postigo, C., Lopez de Alda, M.J., Barcelo, D. (2008). Fully automated determination in the low nanogram per liter level of different classes of drugs of abuse in sewage water by on-line chromatography-electrospray-tandem mass spectrometry. *Anal Chem.* 80:3123–3134.
- Richardson, S.D. (2009). Water analysis: emerging contaminants and current Issues. *Anal. Chem.* 81:4645-4677
- Tscharke, B.J., Chen, C., Gerber, J.P et al. (2016). Temporal trends in drug use in Adelaide, South Australia by wastewater analysis. *Sci Total Environ.* 565:384–391.
- Tscharke, B.J., Chen, C., Gerber, J.P. et al. (2016). Temporal trends in drug use in Adelaide, South Australia by wastewater analysis. *Sci Total Environ.* 565: 384–391.
- Van Nuijs, A.L.N., Castiglioni S., Tarcomnicu, I., Postigo, C., et al. (2011). Illicit drug consumption estimations derived from wastewater analysis: A critical review. *Science of The Total Environment.* 409(19): 3564-3577.
- Wang, Z., Shao, X. T., Tan, D. Q. et al. (2019). Reduction in methamphetamine consumption trends from 2015 to 2018 detected by wastewater-based epidemiology in Dalian, China. *Drug Alcohol Depend.* 194:302–309.
- Yadav, M. K., Short, M. D., Aryal, R. et al. (2017). Occurrence of illicit drugs in water and wastewater and their removal during wastewater treatment. *Water Research.* 124:713-727.
- Yazıcı, L., Yılmaz G. (2020). Hybrid Vigor for Alkaloid Contents in Opium Poppy *Papaver somniferum L.* *Agricultural Science Digest*, 40(3): 290–294.

- Yazıcı, L., Yılmaz G. (2021). Investigation of Alkaloids in Opium Poppy (*Papaver somniferum L.*) Varieties and Hybrids. *Journal of Agricultural Sciences (Tarım Bilimleri Dergisi)* 27(1):62 – 68.
- Yazıcı, L. (2020). 1. Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Alanında Teori ve Araştırmalar II Bölüm Adı: Türkiye’de Haşhaş (*Papaver Somniferum L.*) Yetiştiriciliği ve İslah Çalışmaları, Yayın Yeri: Gece Publishing, ISBN:978-625-7319-11-9, Bölüm Sayfaları:105-136.
- Zeng, Q., Li, Y., Yang S. (2013). Sludge Retention Time as a Suitable Operational Parameter to Remove Both Estrogen and Nutrients in an Anaerobic-Anoxic-Aerobic Activated Sludge System. *Environmental Engineering Science*, 30(4):161-169.
- Zuccato, E., Castiglioni, S. (2009). Illicit drugs in the environment. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 367:3965-3978.

Bölüm 8

SOĞUKTA MUHAFAZA KOŞULLARINI DESTEKLEYİCİ YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR

Tuncay YILMAZ¹

¹ Dr. Tuncay Yılmaz, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Gıda Mhendisliği Bölümü, <https://orcid.org/0000-0001-8756-2724>

Giriş

Soğukta muhafaza yöntemi gıdaların raf ömrünü uzatma açısından sıklıkla başvurulan uygulamalar arasında yer almaktadır. Gıdaların soğuk muhafaza sırasında daha yüksek besin değerine ve hijyenik sahip olması için ise depo ortamında yapılabilecek iyileştirmeler olumlu katkı sağlayabilmektedir. Bu kapsamda soğuk ortam yüzeylerine antimikrobiyal özellik kazandırılması sayesinde hijyenin artırılması ve bulaşmaların önlenmesi mümkün olabilmektedir. Bir diğer yandan özellikle meyve sebze depolama sırasında etilen gazı salınımının takibi ve kontrolü ile ürün tazeliği çok daha uzun süre için korunabilmektedir. Bu derlemede buzdolabı koşullarında muhafaza kapsamında metal oksit uygulamaları ve etilen gazı kontrolünün sağlayabileceği olumlu katkılar incelenmiştir.

Gıdaların muhafazasında en yaygın uygulama, bakteri gelişimini baskılamak için kullanılan yöntemlerden biri olan soğukta saklama olsa da çeşitli durumlarda soğukta muhafaza tek başına yeterli olamamakta ve özellikle uygun olmayan depolamaya bağlı olarak restoran, otel gibi toplu tüketimin olduğu yerlerde gıda kaynaklı hastalıklara sıkça rastlanmaktadır (Bonner et al., 2001; Jackson et al., 2007). Yapılan çalışmalara göre gıda kaynaklı hastalıklara toplu tüketim yerlerinden çok bireysel kullanıcıların maruz kaldığı ortaya konmuştur. Oluşan riskin temel sebebi olarak uygun olmayan soğukta muhafaza uygulamaları veya uygun olmayan buzdolabı hijyeni şeklinde değerlendirilebilir (Ryan et al., 1996; Jackson et al., 2007). Bu durum özellikle sonrasında ısı işlem görmeden tüketilen (ready-to-eat) gıdalar için önemli risk oluşturmaktadır. Ev tipi buzdolabındaki yüzeylerde hijyen koşullarının uygun olmayışı yanında, el teması, yıkanmamış ürünler, ambalaj sızıntıları sonucunda *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* ve *Escherichia coli* gibi çeşitli patojen ve saprofit bakterilerin yanında küf geliştiğine (Johnson et al., 1998; Jackson et al., 2007) dair verilerin bulunmaktadır. Ayrıca buzdolaplarında çapraz kontaminasyon riskinin yüksekliği gıda güvenliği açısından soğukta muhafazanın yeterli olmadığını bunun yanında buzdolabı iç yüzeyi ve buzdolabında sirküle olan havanın modifiye edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Gıda ile temaslı yüzeylerde hijyenik koşulları iyileştirmek

Antimikrobiyal yüzey oluşturma konusunda günümüzde birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çerçevede, özellikle gıda ambalaj malzemesine ilave edilen antimikrobiyal maddeler olarak, organik asit, sorbit asit, gümüş, zeolit, baharat ve bitki ekstraktları, enzimler, lizozim, nisin, triklosan gibi antibiyotikler ve bakteriosinler kullanılmaktadır (Han 2000). Doğal antimikrobiyallerin dayanımları ile ilgili sorunlar olabileceği ve yüksek sıcaklık uygulanan plastik proseslerinde bozunabilecekleri düşünülmektedir. Ayrıca triclosan gibi antibiyotiklerin %0,1-5 seviyelerinde bile bak-

teri yağ asit sentezini engelleyerek geniş spektrumlu etki göstermelerinin yanında (Bradi et al., 2002) bakterilerin zaman içinde bu tip bileşenlere direnç kazanmaya başlamaları sorun olarak görünmektedir (Levy, 2001). Bir diğer yaygın uygulama ise ozonla sterilizasyondur. Ozon çok geniş spektrumlu bir dezenfektan olup 0.01 ppm seviyelerinde bile bakterilere karşı oldukça etkilidir. Bu özellik ozonun kuvvetli okside edici etkisinden kaynaklanmaktadır (Graham et al., 2000). Ancak ozonun kontrolünün sağlanması ve etkin dozajının belirlenmesi çalışma gücüne sebep olabilmektedir.

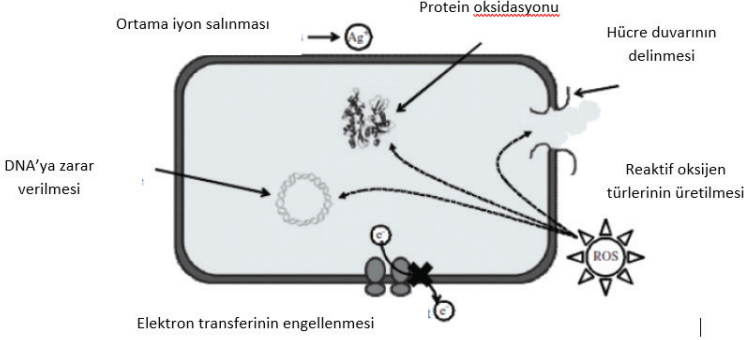
Antimikrobiyal uygulamaları çerçevesinde çeşitli formlarda gümüş yaygın olmakla birlikte, özellikle nano boyutlu metal oksitler (seramikler) yakın zamanda plastik, sağlık, tekstil, boya endüstrisi alanlarında yapılan çalışmalara konu olmaktadır (Chen and Chen 2002; Morones et al., 2005, Garland 2004; Brody et al., 2008).

Nano teknoloji yardımıyla antimikrobiyal yüzey oluşturmak

Antimikrobiyal yüzey ve film oluşturmaya yönelik çalışmalarda, katılan etken maddenin etkinliğini arttırmaya yönelik araştırmalar sırasında partikül büyüklüğünün önemli olduğu tespit edilmiştir (Shi et al., 2010). Bu durum nano materyallerin kullanımını gündeme getirmektedir. Nano teknoloji biyolojik ve biyolojik olmayan yapıların, incelendiği bir alan olup 1-100 nm boyutlarında materyallerin incelendiği bilim alanıdır (Schaefer, 2010). Nano boyutlarda maddelerin kimyasal, fiziksel, ve optik özellikleri büyük oranlarda değişmekte ve bu durum daha etkili bileşiklerin oluşmasına daha az miktarda daha etkin kullanılabilmelerine olanak tanımaktadır (Rai et al., 2009; Schaefer, 2010; Brody et al., 2008). Nano partiküllerin yüksek performansları yüzey alanlarına karşı hacim oranlarının oldukça düşük olması şeklinde ifade edilebilmektedir (Emamifar et al., 2011a; Schaefer, 2010). Antimikrobiyal ajan olarak kullanılan metal ve metal oksit nano bileşikler gümüş, altın, çinko oksit, silika, titanyum oksit, alümina, demir oksit, şeklinde sıralanabilirler.

Nano materyallerin etki mekanizması

Nano materyallerin antimikrobiyal etkileri çeşitli mekanizmalarla tanımlanabilmektedir. Nano malzemeler mikrobiyal hücre ile doğrudan etkileşime girebildikleri gibi hücre bileşenlerini okside edebilirler veya reaktif oksijen türleri üreterek ya da ağır metal iyonlarının çözülmesi ile zarar verebilirler. (Duncan, 2011; Lin et al., 2008, Emamifar 2011a). Bu etkiler Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Nano materyallerin antimikrobiyal etki mekanizmaları (Emamifar, 2011a)

Seramik tozlar grubunda yer alan Çinko oksit (ZnO), Magnezyum Oksit (MgO), kalsiyum oksit (CaO), ve bakır oksit (CuO) gibi bileşiklerin önemli antimikrobiyal etkilerinin olduğu çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Shi et al., 2010). Özellikle MgO ve CaO metal oksitleri *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, ve *Bacillus subtilis* gibi test bakterilerine karşı en yüksek antimikrobiyal etkiyi göstermiştir, ancak sözkonusu sadece gram + bakteriler olduğunda ZnO, en kuvvetli antimikrobiyal etkiyi göstermektedir (Sawai et al., 1995). Bu tip inorganik bileşiklerin gerek insan sağlığı için önemli mineral maddeleri içermesi gerekse de düşük miktarlarda etkin oluşları ve ayrıca metal oksit formlarının insan tüketiminde toksik etki göstermemesi önemli avantaj sağlamaktadır (Gordon et al., 2011; Shi et al., 2010, Sawai and Yoshikawa, 2004). Bunun yanında FDA'ya göre bu bileşikler GRAS olarak tanımlanmaktadır. Çinko oksit gibi birleşiklerin bu anlamda kullanımı gümüş bileşiklere kıyasla daha sağlıklı ürünlerin oluşturulması açısından önemlidir (Tiwari et al., 2008; Chaudhry et al, 2008; Emamifar 2011b) Bakır (Cu), gümüş (Ag), paladyum (Pd), titanyum (Ti) doğal olarak bulunan metaller olup bazı durumlarda esansiyel mineral özelliği göstermektedir. Bu iyonlar belirli konsantrasyonların altında ökaryotik hücrelere zararlı etkileri olamadığı belirlenmiştir. Ancak nano düzeydeki etkileri konusunda geniş çaplı araştırmaların yapılması gerekmektedir (Llorens, 2011).

MgO, CaO ve ZnO gibi metal oksit tozları geniş kapsamlı antibakteriyel etkinin yanında, antibakteriyellere ve sıcaklığa karşı dirençli olan *Bacillus subtilis* sporlarına karşı da önemli letal etki göstermektedir (Sawai et al., 1995). Metal oksitlerin antimikrobiyal etkinliği üzerine; karışım konsantrasyonu, pH, maruz kalma süresi, tozun yüzey özellikleri, aktif oksijen

üretimi ve partikül büyüklüğü gibi faktörler etkilidir (Zhang, 2007; Sawai et al.; 1995). Bu faktörlerin etkileşimine bağlı olarak, bakteri yüzeyindeki alkanite, CaO ve MgO ile temas edilmesi durumunda antimikrobiyal etki üzerinde majör etkiye sahiptir (Sawai et al., 2005). CaO ve MgO ile bakteri temas yüzeyinde O^{2-} gibi aktif oksijen oluşumları gözlenmiştir. *Escherichia coli*, *L. Monocytogenes* ve *S. Typhimurium* üzerine CaO etkisi üzerine yapılan çalışmada, %0,05 konsantrasyonda 10 dakikada, alkaline pH seviyesinde yüksek letalite sağlandığı tespit edilmiştir (Bae et al., 2006). Alkali ortamlarda CaO'nun fungusit etkisinin de önemli olduğu tespit edilmiştir (Shi et al., 2010).

Çinko oksit (ZnO) çeşitli reaksiyonlar sayesinde antimikrobiyal etki göstermektedir bunlar;1) reaktif oksijen türleri (ROS) arasında yer alan H_2O_2 üretimi ile protein, DNA ve yağ yıkımı sağlamak, 2) ZnO nanopatiküllerinin membranda yığılımına bağlı olarak bakterilerin zar dizilimini bozmak, 3) Zn iyonlarının salınımı ile bakteri membranını delmek şeklinde sıralanabilir. ZnO etkinliği UV ve görünür bölge ışığı ile artarak elektron ve boşluk çiftleri oluşturur ($e^- h^+$), böylece H_2O molekülleri parçalanarak bir seri reaksiyon sonucunda H_2O_2 üretimi sağlanır (Gordon et al., 2011; Sawai et al., 1998). H_2O_2 'nin özelliği negatif yüklü olan diğer hidroksil radikallerinden ve süper oksitlerden farklı olarak hücre içine girebilmesidir. Çünkü negatif yüklü partiküller negatif yüklü hücre duvarı olan bakterilerin içine giremez ve sadece hücre dış duvarına direk temas ile zarar verebilirler. Üretilen H_2O_2 miktarı artan yüzey ve azalan partikül büyüklüğü ile doğru orantılı bulunmuştur (Padmavathy and Vijayaraghava, 2008; Emamifar, 2011a). Sawai et al., (1996) azalan partikül büyüklüğünün toksik etkiyi arttırdığını ortaya koymuştur. Bakterilerin bu etkilere karşı hassasiyetleri hücre duvarlarının yapısal ve kimyasal özellikleri ile ilişkili olup ZnO gram + bakterilere karşı gram -'lere kıyasla daha etkilidir (Sawai et al., 1995). ZnO'nun minimum inhibisyon konsantrasyonu (MIC) *B. subtilis* için 2000-12500 ppm iken *Escherichia coli* için bu değer 50000-100000 ppm seviyelerine ulaşmaktadır (Sawai et al., 1996; Sawai et al., 1995). Adams et al., (2006) yaptığı çalışmada 10 ppm nano ZnO'nun *B. subtilis*'de %90 azalma sağlarken *Escherichia coli*'de sadece %48 azalma sağladığını tespit etmiştir. Bu durum, hücre duvarı polaritelerinin farklılığı ile açıklanabilmektedir. *Staphylococcus aureus* membranları *Escherichia coli* membranlarına göre daha düşük negativite göstermekte bu durum negatif yüklü süperoksit radikal anyonlarının ve peroksit iyonlarının daha yüksek miktarda penetre olmasını sağlamakta ve *Staphylococcus aureus*'da daha fazla letalite oluşturmaktadır (Sonohara et al., 1995; Gordon et al., 2011). Özellikle bazı mikroorganizmaların hücre duvarları O^{2-} gibi oksidatif özellikli bileşiklerden çok daha yüksek oranda etkilenirken *Escherichia coli* gibi bakteriler ise H_2O_2 gibi reaktif-

lerden yüksek oranda etkilenebilmektedir (Zhang et al, 2007). Dolayısıyla etki mekanizmaları özelinde metal oksitlerin birbirlerine karşı üstünlüklerini etki ettikleri bakteri grubuna göre değişkenlik göstermektedir.

Yapılan çalışmalara göre nano MgO ve CaO *Escherichia coli*, *Bacillus cereus* ve *Bacillus globigii* üzerinde yüksek letalite gösterirken, ZnO'nun hücre içindeki birikimine bağlı olarak %100'e varan letalitelere ulaştığı tespit edilmiştir. Düşük partikül büyüklüğündeki (8 nm>50-70 nm>1 um) ZnO, ışık altında patojenler de dahil birçok bakteri türüne karşı antimikrobiyal etki göstermektedir (Jones et al., 2007).

Yüksek yüzey enerjisine bağlı olarak nano partiküllerin van Der Waals' elektrostatik etkisine bağlı olarak topaklanma riski sözkonusu olmaktadır, sonuçta bu durum bakteriostatik etkide azalmalara sebep olacaktır. Yapılan çalışmalar yüksek konsantrasyonun antimikrobiyal etkiyi arttırdığını ortaya koymuş olsa da aglomerasyona bağlı olarak antimikrobiyal etkinlikte azalma riski sözkonusudur. Bir diğer konu ise bu aglomerasyonun bakteri hücresinde olması durumunda letalitenin artacak olmasıdır (Zhang et al., 2007, Shi et al., 2010).

Antibakteriyel etki ile yapılan çalışmalarda metal oksitlerin kullanıldığı formların bu özellik üzerinde etkili olduğunu ortaya konmaktadır. Gajjar et al., (2009)'da Ag, ZnO ve CuO'nun, yığın, iyon ve nano formlarındaki antibakteriyel etkilerini araştırılmış ve nano form'un tüm metal oksitlerde iyon form ile benzer etki gösterirken yığın formlarından oldukça etkili olduğu ortaya konmuştur. Kombinasyon incelemelerine göre ise nano Ag + nano CuO, bireysel etkiden fazlasını sinerjistik olarak gösterebilmektedir. Bu durumun metal oksitlerin değişen etki mekanizmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmadan çıkan bir diğer sonuç ise CuO ve Ag bakteriosidal etki gösterirken belirtilen dozlarda ZnO'nun daha çok bakteriostatik etki gösterdiği'dir.

Metal oksit partiküllerinin gerekli etkiyi göstermek için hücre içine girmesinin gerekli olmadığı, sadece temasın ve buna bağlı olarak o bölgedeki mikro çevrenin değiştirecek ROS üretimini yeterli olduğuna dair yapılan bir çalışmada, *Vibrio fischeri*, *Vibrio crusteceans*, *Daphnia magna*, *Thamnocephalus platyurus* üzerine nano ve yığın formdaki ZnO, CuO ve TiO₂'nin etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak ZnO'nun tüm formlarda yüksek toksik etkisi olduğu ortaya konmuştur. Bu bakteriler üzerine TiO₂ yeteri kadar toksik etki göstermezken CuO'nun etkinliği ortama verdiği iyon ile orantılı bulunmuştur (Heinlaan et al., 2008).

Candida albicans, *Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus niger*, *Rhizopus stolonifer* küf türlerine karşı, MgO ve CaO benzer etkiyi gösterirken ZnO'nun daha yüksek konsantrasyonda inhibitif olduğu tespit edilmiştir (Sawai and Yoshikawa, 2004).

ZnO (20 nm) ilave edilmiş kağıtların *Escherichia coli* üzerine antimikrobiyal etkisi üzerine yapılan çalışmada 24 saat sonunda bakteri sayısı ZnO içermeyen kağıtta 5 logaritmadan 8 logaritma seviyesine çıkarken, ZnO içeren kağıtlarda bu değer 0'a inmektedir. Bu durum ZnO'nun *Escherichia coli* üzerinde bakteriosidal etki gösterdiğine dair açık bir örnektir (Ghule et a., 2006).

Campylobacter jejuni, *Salmonella enterica*, *Serovar enteritidis*, *Escherichia coli* üzerine (30 nm) ZnO'nun etkisi hakkında yapılan çalışmada, 0,3 mg/ml ZnO *Campylobacter jejuni* üzerine 3 saat sonunda 8 log azalma sağlamıştır. ZnO hücre morfolojisinde değişikliğe sebep olmaktadır, sağladığı oksidatif strese bağlı olarak hücre duvarını parçalamaktadır (Xie et al., 2011).

CuO iyonları implante edilmiş paslanmaz çeliğin antimikrobiyal özellikleri üzerine yapılan çalışmada, CuO'nun *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli* üzerine etkili olmanın yanında metal yüzeyin korozyon direncini de arttırdığı tespit edilmiştir (Dan et al., 2009). Antimikrobiyal etkinin kaynağı Cu iyonlarının bakteri hücre duvarlarına zarar verip işlevsiz hale getirmesine, sonrasında bakteri çekirdek ve stoplazmasının zarar görmesidir.

Soğuk depolamada etilen gazı kontrolünün sağlanması

Buzdolabında saklanan meyve ve sebzelerin tazeliğini uzun süre korumak da önem kazanan bir konudur. Bu amaçla buzdolaplarından etilen uzaklaştırmak çözüm önerisi olarak düşünülebilmektedir. Bu amaçla etilen emici sistemler bulunmaktadır. Çünkü meyveler tarafından üretilen etilen meyvelerde yumuşamalara sebep olmakta, ayrıca klarofil bozulumunu hızlandırmaktadır (Knee, 1990; Ozdemir and Floros, 2004). En yaygın bilinen ekonomik absorblama sistemleri potasyum permanganat içeren silika komplekslerinden oluşmaktadır. Silika, etileni absorblar ve potasyum permanganat ise etileni etilen glikol'e okside eder. Ancak toksik risk oluşturması sebebi ile permanganat gıda ambalaj malzemelerine katılamamaktadır (Zagory, 1995). Paladyum içeren materyallerin yüksek etilen tutucu özellikleri ve bu özelliklerini yüksek sıcaklık ve nemde de göstermeleri kullanım alanını genişletmektedir. Aktif kömür içeren paladyum cloridler etileni asetaldehide okside etmektedirler (Fujimoto et al., 1974). Paladyum içeren zeolitler permanganatlardan daha fazla etilen tutucu özellik gösterir (Terry et al., 2007). Ayrıca TiO₂ gibi fotokatalitik materyaller de etileni H₂O ve CO₂'ye okside etmektedir. Nano gümüşünde benzer özellik gösterdiği tespit edilmiştir (Llorens et al., 2011; Fernandez et al., 2010). Etilen tutucu sistemlerden, aktif karbon içeren PdCl kivi ve muzun yumuşamasını geciktirmekle birlikte, ıspanaktaki klorofil kaybını da azaltmaktadır (Abe and Watada, 1991; Ozdemir and Floros, 2004).

Sonuç

Gıdaların soğukta muhafazası bilinen yaygın bir uygulama olmanın yanında özellikle meyve sebzelerin yüksek besin içeriği ve güvenilir olarak daha uzun süreli depolanmalarında yenilikçi yaklaşımların katkısı olduğu görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında temaslı yüzeylerin anti-mikrobiyel özellik kazandırılmasında nano metal oksit bileşiklerin kullanımı hem mikrobiyal kalitenin daha uzun süreli sağlanmasında hem de endüstriyel adaptasyon açısından son derece avantajlı ve güvenilir bir uygulama olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca meyve sebze raf ömrünü iyileştirmek için depolama ortamının etilen seviyesinin kontrolü de önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu açıdan bakıldığında gıda ile doğrudan ya da dolaylı temaslı yüzeylerin nano metaller ile modifikasyonu ile hem etilen kontrolü hem de mikrobiyal yükün kontrolü sağlanmış olabilecek ve böylece depolama ortamının kalitesi artırılırken dolayısıyla depolanan gıdanın kalitesi de korunabilecektir.

KAYNAKLAR

- Abe, K. and Watada, A.E., 1991, Ethylene absorbent to maintain quality of lightly processed fruits and vegetables. *Journal of Food Science*, 56, 1589–1592.
- Adams, L. K.; Lyon, D. Y., Alvarez, P. J. J., 2006, Comparative eco-toxicity of nanoscale TiO₂, SiO₂, and ZnO water suspensions. *Water Research*, 40, 3527-3532.
- Bae D.H., Yeon J.H., Park S.Y., 2006, Bacteriocidal effect of CaO (Scallop-Shell powder) on foodborne pathogenic bacteria, *Archives of Pharmacal Research*, 29, 298-301.
- Bonner, C., Foley, B., Wall, P., & Fitzgerald, M., 2001, Analysis of outbreaks of infectious intestinal disease in Ireland, 1998 and 1999. *Irish Medical Journal*, 94, 142–144.
- Bradi, J. J., Wale, M.C.J., 2002, The antibacterial activity of triclosan-impregnated storage boxes against *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus cereus* and *Shewanella putrefaciens* in conditions simulating domestic use, *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 49, 87-94.
- Brody, A. L., Bugusu, B., Han J. H., Sand C. K., McHugh T. H., 2008, Innovative food packaging solutions, *Institute of food technologists*, 73, 107-116
- Chen, M., Chen S., 2002, Process for preparing antibacterial antimildew polyacrylic fibres and its filter net for air conditioner. Patent number CN 1355335.
- Dan Z.G., Ni, H.W., Xu, B.F., Xiong, J., Xiong, P.Y., 2005, Microstructure and antimicrobial properties of AISI 420 stainless steel implanted by copper ions, *Tin Solid Films*, 492, 93-100.
- Duncan, T.V., 2011, Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors, *Journal of Colloid and Interface Science*, in press
- Emamifar^a, A., 2011, Applications of antimicrobial polymer nanocomposites in food packaging, *Advances in Nanocomposite Technology*, Ed: Abbas Hashim, INTECHWEB.ORG, Rijeka, Croatia, 299-318.
- Emamifar^b, A., Kadivar, M., Shahedi, M. & Solaimanianzad, S., 2011, Effect of nanocomposite packaging containing Ag and ZnO on inactivation of *Lactobacillus plantarum* in orange juice. *Food Control*, 22, 408-413.
- Fernandez, A., Soriano, E., Hernandez-Muñoz, P., & Gavara, R., 2010, Migration of antimicrobial silver from composites of polylactide with silver zeolites. *Journal of Food Science*, 75, 186-193.
- Fujimoto, K., Takeda, H., Kunugi, T., 1974, Catalytic oxidation of ethylene to acetaldehyde. Palladium chloride-active charcoal catalyst. *Industrial Engineering Chemistry*, 13, 237-242.

- Garland A. 2004. Commercial applications in nanotechnology. In: Garland A, editor. Nanotechnology in plastics packaging. Leatherhead, U.K.: Pira Intl. p 17–63.
- Graham, D.M. Ozone as an Antimicrobial Agent for thr Treatment, Storage and Processing of Foods in Gas and Aquous Phases, Petition Control Branch, Food and Drug Administration, Department of Health and Human Services, Washington DC 2020R
- Ghule K., Ghule, A. V., Chen, B. J., Liang, Y. C., 2006, Preparation and characterization of ZnO nanoparticles coated paper and antibacterial activity, Green Chemistry, 8, 1034-1041.
- Gordon, T., Perstein, B., Houbara, O., Felner I., Banin, E., Margel., S., 2011, Synthesis and characterization of zinc/iron oxide composite nanoparticles and their antibacterial properties, Colloids and Surfaces A: Pysicochemical Engineering Aspects, 374, 1-8.
- Han, J. H., 2000, Antimicrobial Food Packaging, Food Technology, 54, 56-65
- Heinlaan, M., Ivask, A., Blinova, I., Dubourguier, H., Kahru, A., 2008, Toxicity of nanosized and bulk ZnO, CuO and TiO₂ to bacteria *Vibrio fischeri* and crustaceans *Daphnia magna* and *Thamnocephalus platyurus*, Chemosphere, 71, 1308-1316.s
- Jackson V., Blair I.S., McDowell D.A., Kennedy J. b, Bolton D.J.,2007, The incidence of signiWcant foodborne pathogens in domestic refrigerators, Food Control, 18, 346–351
- Jin, T., Sun, D., Su, J. Y., Zhang, H., & Sue, H. J., 2009, Antimicrobial efficacy of zinc oxide quantum dots against *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enteritidis*, and *Escherichia coli* O157:H7. Journal of Food Science, 74, 46-52.
- Johnson, A. E., Donkin, A. J., Morgan, K., Lilley, J. M., Neale, R. J., Page, R. M., et al., 1998, Food safety knowledge and practice among elderly people living at home. Journal of Epidemiology and Community Health, 52, 745–748.
- Jones, N., Ray, B., Ranjit, K. T., Mana, A. C., 2007, Antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions on a broad spectrum of microorgansims, FEMS Öicrobiol Lett, 279, 71-76.
- Knee, M. 1990. Ethylene effects in controlled atmosphere storage of horticultural crops. In: Food Preservation by Modified Atmospheres, 25–235. Eds., Calderon M. and Barkai-Golan, R. CRC Press, Boca Raton.
- Levy, S. B., 2001, Aantibacterial houshold products: Cause for cpncern, Emerging Infection Diseases, 7, 512-515
- Li, Q., Mahendra, S.; Lyon, D. Y.; Brunet, L.; Liga, M. V.; Li, D. & Alvarez, P. J. J., 2008, Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial

- control: Potential applications and implications. *Water Research*, 42, 4591-4602.
- Llorens, A., Lloret, E., Picouet, P.A., Trbojevich, R., Fernandez, A., 2011, Metallic-based micro and nanocomposites in food contact materials and active food packaging, *Trends in Food Science & Technology*, 1-11
- Morones, J. R.; Elechiguerra, J. L.; Camacho, A.; Holt, K.; Kouri, J. B.; Ramírez, J. T., Yacaman, M. J., 2005, The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*, 16, 2346–2353
- Ozdemir, M., Floros, J. D., 2004, Active food packaging technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44, 185–193.
- Rai, M.; Yadav, A. & Gade, A. 2009, Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials, *Biotechnology Advances*, 27, 6–83.
- Ryan, M. J., Wall, P. G., Gilbert, R. J., GriYn, M., & Rowe, B., 1996, Risk factors for outbreaks of infectious intestinal disease linked to domestic catering, *Communicable Disease Report CDR Review*, 13, 179–182.
- Sawai, J., Igarashi, H., Hashimoto, A., Kokugan, T., Shimizu, M., 1995, Evaluation of growth inhibitory effect of ceramics powder slurry on bacteria by conductance method, *Journal of Chemical Engineering of Japan* 28, 288–293.
- Sawai, J., Igarashi, H., Hashimoto, A., Kokugan, T., Shimizu, M., 1996, Effect of particle size and heating temperature of ceramic powders on antibacterial activity of their slurries. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 29, 251–256.
- Sawai, J., Shoji S., Igarashi, H., Hashimoto, A., Kokugan, T., Shimizu, M., Kojima H., 1998, Hydrogen Peroxide as an Antibacterial Factor in Zinc Oxide Powder Slurry, *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 86, 521–522.
- Sawai, J., Yoshikawa, T., 2004, Quantitative evaluation of antifungal activity of metallic oxide powders (MgO, CaO and ZnO) by an indirect conductimetric assay. *Journal of Applied Microbiology*, 96, 803–809.
- Sawai, J., Himizu K., Yamamoto O., 2005, Kinetics of bacterial death by heated dolomite powder slurry, *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 1484-1489.
- Schaefer, H.E., *Nanoscience*, 2010, Springer, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- Shi, L.E., Xing L., Hou, B., Ge, H., Guo, X., Tang, Z., 2010, Inorganic nano metal oxides used as anti-microorganism agents for pathogen control, *Technology and Education Topics in Applied Microbial Biotechnology*, Ed. A. Mendez-Vilas, Formatex, 361-368.
- Sonohara, R., Muramatsu, N., Ohshima, H., Kondo, T., 1995, Difference in surface properties between *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*

as revealed by electrophoretic mobility measurements, *Biophysical Chemistry*, 55, 273–277.

- Terry, L., Meyere, M., Reay, N., Ilkenhans, T., Poulston S., Rowsell et al., 2007, Suppression of avocado ripening with new palladium promoted ethylene scavenger. Proceedings VI World Avocado Congress, Vi~na del Mar, Chile
- Tiwari, D. K., Behari J., Sen, P., 2008, Application of nanoparticles in waste water treatment, *World Applied Science Journal*, 3, 417-433.
- Xie, Y., He, Y., Irwin, P. L., Jin, T., Shi, X., 2011, Antibacterial Activity and Mechanism of Action of Zinc Oxide Nanoparticles against *Campylobacter jejuni*, *Applied And Environmental Microbiology*, 77, 2325–2331.
- Zagory, D. 1995. Ethylene-removing packaging. In: *Active Food Packaging*, 38–54. Ed., Rooney, M.L. Blackie Academic and Professional, London.
- Zhang, L.; Jiang, Y.; Ding, Y.; Povey, M. & York, D., 2007, Investigation into the antibacterial behaviour of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids), *Journal of Nanoparticle Research*, 9 479–489.

Bölüm 9

TARIMSAL ATIKLARIN ADSORBAN OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

*Nesli AYDIN¹
Gül KAYKIOĞLU²*

1 Dr. Öğr. Üyesi Nesli AYDIN, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Çorlu, Tekirdağ, Türkiye, naydin@nku.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7561-4280>.

2 Doç. Dr. Gül KAYKIOĞLU, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Çorlu, Tekirdağ, Türkiye, gkaykioglu@nku.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-3271-211X>.

GİRİŞ

Son yıllarda nüfus artışı ve endüstrileşmeye paralel olarak alıcı ortamlar çok çeşitli kirleticiler ile zarar görmekte olup, birçok kirletici madde için ilgili mevzuatlarda sınırlayıcı hükümler bulunmamaktadır. Bu kirleticiler ilaç kalıntıları, deterjanlar, pestisitler, boyar maddeler vb. olabilmektedir. Konvansiyonel atıksu arıtma tesislerinde söz konusu kirleticilerin giderilmesi mümkün olamamaktadır. İleri arıtma yöntemleri kullanılması gerekmektedir. Günümüzde bu kirleticilerin çevreye salınması özellikle içme suyu açısından oldukça önem kazanmıştır. Konvansiyonel atıksu arıtma tesislerinde giderilemeyen çevresel kirleticilerin giderilmesi için kullanılabilir olan yöntemler; adsorpsiyon, ileri oksidasyon prosesleri ve membran proseslerdir. Ancak bu yöntemlerin birçoğu yüksek ilk yatırım, işletme ve bakım maliyetleri, işletilmesinin zor olması ya da fazla arıtma çamuru üretimi gibi dezavantajlara sahiptir. Adsorpsiyon prosesinin uygulanmasının kolay olması, ilave kimyasal ihtiyacının olmaması, çok çeşitli kirleticileri yüksek verim ile giderebilmesi gibi üstünlükleri bulunmaktadır. Adsorpsiyon işlemlerinde en yaygın kullanılan adsorban aktif karbondur ve maliyeti oldukça yüksektir. Son yıllarda çok çeşitli malzemelerin (zeolit, sepiolit, arıtma çamuru, pirinç kabuğu, meyve kabukları vb.) adsorban olarak kullanıldığı, su ortamlarından çeşitli kirleticilerin giderimi ve rejenere edilebilmesi üzerine çok sayıda çalışma yürütülmüş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Tarımsal atıklar, bol miktarda bulunabilmesi ve yenilenebilir olmasının yanında çoğunlukla boşluklu ve gözenekli bir yapıya sahip olup, karboksil ve hidroksil gibi fonksiyonel grupları içermektedir. Bu sebeple de biyolojik bir adsorban olarak kullanılabilir. Bu sayede hem atıksu kirliliği azaltılmakta hem de ciddi bertaraf sorunları yaşanan tarımsal atıklar için yararlı kullanım olanağı ortaya konulabilmektedir.

Türkiye’de yılda 184.593.134 ton bitki üretilerek 62.206.754 ton bitkisel atık oluştuğu bilinmektedir (URL 1). Tarımsal ürünlerin üretilmesi aşamasında, üretilen ürünlerin işlenmesinde ve sonrasında oluşan atıklara tarımsal atıklar denilmektedir. Tarımsal atıkların da atık yönetimi çerçevesinde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Diğer katı atıklara kıyasla çok daha az tehlikeli, çevreye olan zararının çok az olduğu ve dönüşümlerinin kısa süreli olduğu bilinen tarımsal atıkların, hammadde olarak yeniden kullanılması önemlidir.

Tarımsal atıklar lignoselülozik maddelerdir ve başlıca yapısal bileşenler lignin, selüloz ve hemiselülozdur (Salleh ve diğerleri, 2011). Lignin aromatik bir polimer olmakla birlikte, karbonil, hidroksil, metil ve diğer fonksiyonel gruplarını içermektedir. Tarımsal atıkların boyarmadde adsorpsiyonunda temel mekanizma genellikle birkaç süreçten etkilenmek-

tedir (Shah ve diğerleri, 2016). Genel olarak, tarımsal atıklar doğrudan bir adsorban görevi görmekte ve adsorpsiyonu artırmak için kimyasal ve fiziksel modifikasyon yoluyla adsorpsiyon kapasitesi arttırılmaya çalışılmaktadır. Literatürde bazı araştırmacılar yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip aktif karbonun üretimi için hammadde olarak tarımsal atıkların kullanımını araştırmışlardır. Hurma ve zeytin çekirdeği, çay yaprakları, hindistancevizi ve badem kabukları, muz kabuğu, portakal kabuğu, fıncık kabuğu, pirinç kabukları ve şeker kamışı posası AC uygulaması için başarı ile kullanılmıştır. Biyoatıklardan AC eldesi gibi birçok değerli ürünün, hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağladığı birçok araştırmada değerlendirilmiştir (Kalderis vd., 2008; Naiya vd., 2009; Foo ve Hameed, 2009).

Boyalar, endüstriyel ürünleri renklendirmek için tekstil, kauçuk, plastik, matbaacılık, deri, kozmetik vb. sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak, önemli miktarda renkli atıksu ortaya çıkmaktadır. Yıllık üretilen boyaların önemli bir kısmının ilgili endüstrilerden gelen atıksulardan deşarj edildiği tahmin edilmektedir (Allen ve Koumanova, 2003). Bu kapsamda en çok boya içeren atıksu üretimi tekstil endüstrisinden kaynaklanmaktadır (Bharathi ve Ramesh, 2013). Boyalar sudaki güneş ışığını emerek yansıtır ve böylece su bitkilerinde bakteri üremesine sebep olabilir ve fotosentezi engelleyebilir. Boyaların kompleks aromatik yapıları aynı zamanda bozunmayı da zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, endüstrilerin boya içeren atıksularının su ekosistemlerine boşaltılmadan önce arıtılması gerekmektedir. Boya içeren bu atıksuların alıcı su kaynaklarına deşarjı, su yaşamının sürdürülebilirliğine ciddi anlamda zarar vermektedir.

Boyaların maruz kalma süresine ve konsantrasyonuna bağlı olarak akut ve/veya kronik etkiler ortaya çıkabilir. Bu etkiler, cilt tahrişi, kanser ya da olarak görülebilir. Spesifik olarak reaktif azo boyalar, tekstil, deri ve plastiklerin renklendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve atıksudaki konsantrasyona bağlı olarak DNA'da mutasyona sebep olabilirler (Gokulan vd., 2019). Bu boyalara uzun süre temas edilmesi solunum yolu hastalıkları ve alerjik reaksiyonlar gibi sağlık sorunlarının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Chung, 2016).

Atıksudan renk giderimi hem görsel anlamda hem de sağlık açısından endişe konusu olmaya devam etmektedir. Gelişen tekniklerin kullanılmasıyla özellikle tekstil endüstrisinden kaynaklı atıksulardan renk giderimi konusu son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Bu kapsamda, atıksudan boya giderimi için adsorpsiyon tekniğinin etkinliği, onu diğer pahalı arıtma yöntemlerine kıyasla oldukça uygun bir alternatif haline getirmiştir.

Bu çalışmada, öncelikle adsorpsiyon mekanizması kısaca açıklanmış

ve tarımsal atıkların adsorban olarak kullanılarak sulu çözeltilerden rengin giderimi konusundaki çalışmalar değerlendirilmiştir.

ADSORPSİYON PROSESİ İLE İLGİLİ MEKANİZMALAR VE TANIMLAR

Adsorpsiyon, bir fazdaki iyon ya da moleküllerin başka bir faz üzerinde tutunması temeline dayanan bir kütle transfer işlemi olarak tanımlanabilmektedir. Sözkonusu fazlar; sıvı-sıvı, gaz-sıvı, gaz-katı veya sıvı-sıvı, gaz-sıvı, gaz-katı veya katı-sıvı olabilmektedir. Adsorplanan maddeye adsorbat, adsorbe edici malzemeye de adsorban denilmektedir. Adsorpsiyon olayı genellikle ekzotermiktir. Adsorpsiyon türleri genel olarak üç tanedir. Bunlar; fiziksel adsorpsiyon, kimyasal adsorpsiyon ve iyonik adsorpsiyondur. Fiziksel adsorpsiyonda, adsorplayıcı ile adsorplanan madde arasında dispersiyon ve ya dipolar etkileşim türünden bir Van der Waals etkileşimi söz konusudur. Bu sebeple bir faza bağlanan molekülün yapısı değişmemekle birlikte, bağlandığı yüzeyde hareketli olabilmektedir. Fiziksel adsorpsiyonda olay tersinirdir. Kimyasal adsorpsiyonda taneciklerin yüzeye bağlanması genellikle kovalent bağ ile olmaktadır. Desorpsiyon zor olabilmekte, desorpsiyon işlemi için kimyasal madde ilavesine ihtiyaç gösterebilmektedir. İyonik adsorpsiyonda yüzeyde tutunma elektiriksel çekim ile olmaktadır. Zıt elektrik yüküne sahip adsorplanan madde ile adsorban yüzeyinin birbirini çekmesi önem kazanmaktadır. Adsorpsiyon mekanizmasının, bir adsorpsiyon çeşidi ile açıklayabilmesi oldukça zor olmaktadır.

ADSORPSİYONA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Adsorpsiyon ile boya giderilmesinde istenen maddenin suda çözünbilmesi, molekül büyüklüğü, adsorbe edilecek kirleticilerin çok bileşenli maddelerden oluşması, pH ve sıcaklık adsorpsiyonu etkileyebilmektedir. Bunlardan başka adsorbanın üzerindeki fonksiyonel gruplar ve spesifik yüzey alanı da önemlidir. Adsorpsiyon işleminde kullanılan en evrensel adsorban aktif karbon olup, yüzey alanları 500-1500 m²/g'dır.

Adsorpsiyon Dengesi ve İzotermiler

Adsorpsiyon işlemi bir denge reaksiyonu olup, çözelti belirli miktardaki adsorban ile temas ettirildiğinde, çözeltideki adsorplanan maddenin konsantrasyonu, adsorban yüzeyindeki konsantrasyon ile dengeye gelen kadar azalmaktadır. Adsorpsiyon dengesi kurulduktan sonra, adsorplanan maddenin çözelti fazındaki konsantrasyonu sabit kalmaktadır. Buna denge konsantrasyonu denilmektedir. Denge durumunda çözeltide kalan konsantrasyona karşılıklı adsorban ağırlığında adsorplanan madde miktarı grafiğe geçilerek adsorpsiyon izotermi elde edilmektedir. İzotermiler, çözeltideki kirleticilerin adsorplanabilmesi için gerekli olan adsorban

miktarını belirlemeyi sağlamaktadır. İzotermeler laboratuvar çalışmaları sonucunda belirlenebilmektedir.

En yaygın kullanılan adsorpsiyon izotermeleri; Langmuir ve Freundlich izotermeleridir. Langmuir izotermi, adsorban yüzeyinin enerji açısından benzer olduğu varsayımıyla, tek tabakalı homojen adsorpsiyonu açıklamak için kullanılmakta ve maksimum adsorpsiyon kapasitesinin tahmin edilmesini sağlamakta olup, aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (El-Halwany, 2010);

$$q_e = \frac{(q_{max} KL C_e)}{(1+KL C_e)} \quad (1)$$

Burada; q_e (mg/g) denge durumunda her birim adsorbanın adsorpladığı kirletici madde miktarını ve C_e (mg/L) adsorpsiyon sonrası denge durumunda çözeltide kalan kirletici madde konsantrasyonunu, KL (L/mg) denge sabiti ve q_{max} tek tabakalı form için gerekli adsorbat miktarını (mg/g) ifade etmektedir (Aydın vd., 2008). Adsorplayıcı madde üzerindeki birikimin tek tabakalı olduğu, adsorplanan maddenin tutunduğu yerde kaldığı ve KL değerinin bir noktadan diğer bir noktaya değişmediği esasına dayanmaktadır.

Freundlich modeli adsorban yüzeyinde gerçekleşebilecek olan adsorpsiyon yoğunluğunu belirlemek için kullanılan amiripik bir eşitliktir. Freundlich modelde kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir (El-Halwany, 2010);

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (2)$$

Burada;

C_e ; adsorpsiyon sonrası çözeltide kalan kirletici konsantrasyonu (mg/L),

q_e ; birim adsorban üzerine adsorplanan madde miktarı (mg/g)

K_f ; deneysel olarak hesaplanan adsorpsiyon kapasitesi

$1/n$; heterojenite faktörüdür.

Yüzey ne kadar heterojen ise $1/n$ değeri o kadar sıfıra yaklaşmaktadır.

ATIKSULARDAN BOYARMAĞDE GİDERİMİ İÇİN KULLANILAN ARITMA TEKNOLOJİLERİ

Atıksulardan boyarmaddelerin giderimi için farklı araştırmacılar tarafından biyolojik, kimyasal, ileri oksidasyon, membran prosesler ve adsorpsiyon gibi çok çeşitli teknolojiler kullanılmıştır. Bunlar Tablo 1'de

özetlenmiştir. Arıtma teknolojileri arasında Tablo 1’de verilen yöntemlerden adsorpsiyon, hızla önem kazanmaktadır. Adsorpsiyon yönteminin en önemli avantajları, düşük maliyetli olması ve ihtiyaç duyulan ekipmanların kolay elde edilen türden olmasıdır. Bu anlamda, aktif karbon, geniş yüzey alanı, mikro gözenek yapısı, yüksek adsorpsiyon kapasitesi sayesinde boya giderimi için kullanışlı bir adsorbandır. Ancak, ticari olarak temin edilebilen aktif karbonun oldukça maliyetli olmasından ötürü araştırmacılar daha ucuz adsorbant bulma arayışı içine girmiştir. Bu kapsamda, özellikle atık malzemelerden daha uygun, verimli, ucuz ve kolay temin edilebilir adsorbant elde etme girişimleri günümüzde ilgi uyandırmaktadır.

Tablo 1. Boyaların Atıksulardan Uzaklaştırılması İçin Kullanılan Teknikler

Arıtma Teknolojisi	Referans
Fenton-flokülasyon	Xiao vd. (2017)
Fenton-oksidasyon	Barros vd. (2006)
Fenton	Kusic vd. (2017), Riano vd. (2017)
Biyolojik Yöntemler	Bhatia vd. (2017)
Fiziksel, biyolojik ve kimyasal yöntemler	Piaskowski vd. 2018
Entegre biyolojik ve kimyasal yöntemler	Garcia-Montano vd. (2008)
Ters ozmoz	Bagastyo vd. (2011)
Elektrokimyasal oksidasyon	Panizza ve Cerisola (2008)
Adsorpsiyon	Kripanand (2021)

TARIMSAL ATIKLARIN ADSORPSİYON ÇALIŞMALARINDA KULLANIMI

Tarımsal atıkların ekonomik değeri ya çok azdır ya da hiç yoktur. Ayrıca bu atıkların bertarafı sorun oluşturmaktadır. Tarımsal atıkların sulu çözeltilerde adsorbant olarak kullanımı bu sebeple büyük önem taşımaktadır. Farklı çalışma koşullarında sulu çözeltilerden farklı boyaların uzaklaştırılması için farklı tarımsal atık malzeme üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Tablo 2, bu tarımsal atıkları kullanan çalışmalara ait örnekleri göstermektedir. Tablo 3 ise bu örneklerde kullanılan adsorbant ve maksimum adsorpsiyon kapasitesi gibi detayları özetlemektedir.

Kabuk Çeşitlerinin Adsorbant Olarak Kullanılması

Sarımsak kabuğunun, metilen mavisi içeren sulu çözeltiden uzaklaştırılmasındaki etkinliği Hameed ve Ahmad (2009) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada, adsorpsiyon izotermi, Langmuir, Freundlich ve Temkin izotermi kullanılarak modellenmiştir. Sarımsak kabuğunun adsorpsiyon kapasitesi sırasıyla 303, 313 ve 323 K sıcaklığında 82.64, 123.45 ve 142.86 mg/g olarak bulunmuştur. Araştırmacılar genel olarak metilen mavisinin polar fonksiyonel grubun varlığından dolayı adsorpsiyon kapasitesinin daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Doğan ve diğerleri (2009), metilen mavisinden renk giderilmesi için doğal hali ile tarımsal bir atık olan fındık kabuğunu incelemiştir.

Hameed ve El-Khaiary (2008a) tarafından kıyılmış, elenmiş, yıkanmış ve 60 °C’de 48 saat boyunca kurutulmuş bakla kabuğunun, Metilen mavisi giderimindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak metilen mavisi konsantrasyonunun artmasıyla boya adsorpsiyonunun azaldığı kaydedilmiştir. Boya adsorpsiyonunun Langmuir adsorpsiyon modeline ve pseudo-birinci derece kinetik modele uyum gösterdiği gözlenmiştir.

Aslan (2020) tarafından yapılan çalışmada, sulu özeltiden Basic Blue 3’ü (BB3) uzaklaştırmak amacıyla kayısı çekirdeği kabuğu ve badem kabuğunu sabit yataklı adsorpsiyon kolonu değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, yatak yüksekliği (1-2 cm), çözelti akış hızı (5-10 mL/dk) ve başlangıç boyar madde konsantrasyonu (10-30 mg/L) gibi deneysel parametrelerin etkileri incelenmiştir. Kayısı ekirdeği kabuğu ve badem kabuğu tarafından BB3’ün giderimi için adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 17.07 ve 24.07 mg/g olarak bulunmuştur.

Kule (2014) tarafından yapılan çalışmada malaşit yeşili boyar madde adsorpsiyonunda elma ve portakal kabuğu kullanmıştır. Adsorpsiyon denemelerinde, çözelti konsantrasyonu, pH ve sıcaklığın etkisi temas süresinin bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. İzoterm değerlendirmelerine göre, Elma kabuğunun Freundlich izoterm modeline (adsorpsiyon kapasitesinin 9,17 mg/g) uyum sağladığı, portakal kabuğunun ise Langmuir modeline (adsorpsiyon kapasitesinin 14,55 mg/g) uyum sağladığı belirlenmiştir. Kinetik değerlendirmesine göre, malaşit yeşilinin elma kabuğu ve portakal kabuğu yüzeyine adsorpsiyonunun en iyi yalancı ikinci dereceden kinetik modele uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.

ağa (2020) alışmasında, adsorban olarak erik çekirdeği kullanılarak Disperse Blue (B3R) boyar maddesinin adsorpsiyon yöntemi ile giderimini incelemiştir. Erik çekirdekleri yıkanmış, 105°C’de etüvde kurutulmuş ve öğütölerek toz hale getirilmiştir. 90 dakikalık temas süresi sonunda denge durumuna ulaştığı tespit edilmiştir. En iyi giderme veriminin pH 12’de elde edildiği ifade edilmiştir. Freundlich izotermine ve adsorpsiyon hızının yalancı ikinci derece kinetik modele uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Tarımsal Atıkları Kullanan Adsorpsiyon Çalışmaları Örnekleri

Tarımsal Atıklar	Adsorpsiyon Çalışmaları	
Kabuk Çeşitleri	Portakal kabuğu	Arami vd. (2005)
	Muz kabuğu	Achak vd. (2009)
	Badem kabuğu	Ahmad ve Mondal (2009)
	Sarımsak kabuğu	Hameed ve Ahmad (2009)
	Fındık kabuğu	Doğan vd. (2009)
Tohum Kabukları	Yer fıstığı kabuğu	Malik vd. (2007)
	Bakla kabuğu	Hameed ve El-Khaiary (2008a)
	Susam, pamuk ve hint kayın ağacı tohumu kabukları	Thinakaran vd. (2008)
	Kauçuk ağacı tohumu kabuğu	Hameed ve Daud (2008)
	Ayçiçeği çekirdeği tohumu	Thinakaran vd. (2008), Hameed vd. (2008)
Saman, Yaprak, Talaş, Kepek vb. Kalıntılar	Kabak çekirdeği kabuğu	Hameed ve El-Khaiary (2008b)
	Yaprak (guava ve anka ağacı, hint leylağı)	Ponnusami vd. 2009; Han vd. (2007); Immich ve Ulson de Souza (2009)
	Pirinç ve buğday kepeği	Wang vd. (2008)
	Gül ve kayın ağacı talaşı	Shukla vd. (2002), Garg vd. (2004), Dulman ve Cucu-Man (2009)
	Muz ağacı sapları	Hameed vd. (2008)
Meyve atıkları	Jack meyvesi	Hameed (2009)
	Ananas kökü	Hameed vd. (2009)
Diğer tarım atıkları	Palmiye yağı	Hameed ve El-Khaiary (2008c)

Salihoğlu (2020) yapmış olduğu çalışmada, adsorban olarak pirinç kabuğu (PK) ve pirinç kabuğu silikası (PK-SiO₂) kullanarak, parlak yeşil boyarmaddesinin adsorpsiyon yöntemi ile giderimini değerlendirmiştir. Her iki adsorban da 80-100 µm arasında olacak şekilde elenmiş ve aynı şartlarda değerlendirilmiştir. Adsorpsiyon denemeleri 30 °C'de 150 rpm çalkalamalı su banyosunda gerçekleştirilmiş olup, optimum pH 7 olarak belirlenmiştir. PK ve PK-SiO₂ adsorbanları için Freundlich modeline ve yalancı ikinci derece kinetik modele uyum belirlenmiş ve maksimum adsorpsiyon kapasitesi sırasıyla 32,36 ve 53,48 mg/g olarak bulunmuştur.

Bir tarımsal atık olan yerfıstığı kabuğu da adsorban olarak kullanılmıştır. Malik vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada, Malakit yeşilinin sulu çözeltiden uzaklaştırılması için yer fıstığı kabuğu kullanılmıştır. Bu malzemenin en önemli avantajı düşük maliyeti ve yaygınlığıdır. Bu anlamda çeşitli kabuklar, bertaraf sorunu yaratan ve genellikle yakıt değeri için kullanılan karbonlu, lifli katı atıklardır. Malik vd. (2007) tarafından yürütülen bu çalışmada, adsorban ZnCl₂ ile aktive edilerek de test edil-

miştir. Bunun için temas suresi, adsorban dozu ve ilk boya konsantrasyonunun etkisi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar, 0,5 g/L dozunda ve 100 mg/L başlangıç konsantrasyonunda, yerfıstığı kabuğu tozu aktif karbonun, 30 dakikalık denge suresinde boyanın % 94.5 oranında uzaklaştırıldığını göstermiştir. Deneysel izoterm verileri, maksimum adsorpsiyon kapasitelerini belirlemek için Freundlich, Langmuir ve BET denklemlerinin doğrusallaştırılmış formu kullanılarak analiz edilerek sonuçların Freundlich izotermine uyduğu raporlanmıştır.

Tablo 3. Adsorpsiyon alışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

Adsorban	n işlem-Aktifleştirme işlemi	Giderilen kirletici	Maksimum adsorpsiyon kapasitesi	İzoterm	Kaynak
Sarımsak kabuğu	-	Metilen mavisi	82.64mg/g (303 K), 123.45mg/g (313 K) ve 142.86 mg/g (323 K)	Langmuir, Freundlich ve Temkin	Hameed ve Ahmad (2009)
Ayçiçeği ekirdeği tohumu	Sülfirik asit ile aktivasyon	Acit Menekşe 17	116.27 mg/g	Langmuir	Thinakaran vd. (2008)
Kabak ekirdeği kabuğu	-	Metilen mavisi	141.92 mg/g	Langmuir	Hameed ve El-Khaiary (2008b)
Guava (Psidium guajava) yaprakları	-	Metilen mavisi	186.2 mg/g	Langmuir	Ponnusami vd. (2009)
Bakla kabuğu	-	Katyonik boya (Metilen mavisi)	192.7 mg/g	Langmuir	Hameed ve El-Khaiary (2008a)

Tohum Kabuklarının Adsorban Olarak Kullanılması

Tohum kabuğu gibi tarımsal katı atıklar, atıksulardaki boya giderimi konusunda adsorban olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler, doğal ortamda büyük miktarlarda mevcuttur ve fiziko-kimyasal özellikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle adsorban olarak yüksek potansiyele sahiptir. Thinakaran vd. (2008) tarafından Asit Menekşe 17 boyasından renk giderilmesi için çeşitli karbonlar ile aktive edilmiş ayçiçeği çekirdeği kabuğunun tozu kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda Langmuir adsorpsiyon kapasitesi 116.27 mg/g olarak bulunmuştur. Aynı malzeme, Hameed vd. (2008) tarafından herhangi bir fiziksel veya kimyasal işleme tabi tutulmadan Metil Menekşe boyasının giderimi için kullanılmıştır. Deneysel bulgular Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modelleri kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçların Freundlich izoterm modeli ile uyumluluk gösterdiği grlmştir. Maksimum sorpsiyon kapasitesi 30 C'de 92.59

mg/g olarak belirlenmiştir.

Benzer şekilde, düşük maliyetli bir adsorban olan kabak çekirdeği kabuğunun sulu çözeltilerden bazik boyanın (Metilen mavisi) uzaklaştırılması konusundaki potansiyeli Hameed ve El-Khaiary (2008b) tarafından araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda, kısa periyotta adsorpsiyon hızının film difüzyonu tarafından kontrol edildiği, daha uzun adsorpsiyon sürelerin ise gözenek difüzyonunun adsorpsiyon hızını kontrol ettiği anlaşılmıştır.

Şekil 1, tohum kabukları adsorban olarak kullanılan ağaç türlerine ait örnekleri göstermektedir.



Şekil 1. Hint Kayın Ağacı (üstte) ve Kauçuk Ağacı (altta)

Kauçuk ağacı tohumunun kabuğu, farklı temas süresi ve başlangıç konsantrasyonuna sahip sulu çözeltilerden bazik mavi boyanın adsorpsiyonu için kullanılmıştır (Hameed ve Daud, 2008). Bu çalışmada tek tabakada adsorpsiyon kapasitesi 30°C'de 227.27 mg/l olarak bulunmuştur. Gerçekleşen adsorpsiyon işleminin pseudo ikinci dereceden kinetik modele uyduğu ve adsorpsiyon izotermine Freundlich izoterm modelini takip ettiğini görülmüştür.

Thinakaran vd. (2008), susam, pamuk ve hint kayın ağacı tohumu kabuklarını Acid Menekşe boyasının sulu çözeltisini kullanarak adsorpsiyon çalışması yürütmüşlerdir. Sonuç olarak, Langmuir ve Freundlich izo-

term modelleri uyguladıklarında ve Langmuir modelinin denge izoterm verilerine uygunluk gösterdiğinin belirlemişlerdir. Langmuir adsorpsiyon kapasitesini ise 116.27 mg/g olarak bulmuşlardır.

Yağız (2016) çalışmasında kivi kabuğu kullanılarak sulu çözeltilerden Rhodamine B ve Metilen mavisi boyarmaddesinin adsorpsiyonunu incelemiştir. Adsorpsiyon çalışmalarında 150 dakikada denge durumuna ulaşıldığı ve sıcaklığın adsorpsiyon verimi üzerine önemli etkisinin olmadığını belirlemiştir. Her iki boyarmadde için ikinci derece kinetik modele uyum belirlenmiştir. Metilen mavisi boyar maddesi için Langmuir izotermine uyum belirlenmiş olup, q_{max} değerleri 25, 35 ve 45°C'de sırasıyla 75.75, 86.20 ve 93.46 mg/g olarak tespit edilmiştir.

Diğer Tarım Atıklarının Adsorban Olarak Kullanılması

Hameed ve El-Khaiary (2008c) tarafından bir adsorban olarak yağ palmyesi lifinin kullanılmasının Malakit yeşilinin uzaklaştırılmasındaki etkisi çalışılmıştır. Yağ palmyesinin liflerinin herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan incelendiği çalışmada Malakit yeşilinin palmye gövdesi lifi üzerini tek tabaka halinde kaplaması 30 °C'de 149.35 mg/g olarak belirlenmiştir. Şekil 2, lifleri Adsorban olarak kullanılan palmye örneklerini göstermektedir.



Şekil 2. Yağ Palmyesi Lifleri

Meyve Atıklarının Adsorban Olarak Kullanılması

Hameed vd. (2009), sulu çözeltilerden metilen mavisinin (bazik boya) adsorpsiyonu için ananas köklerini kullanmıştır. İşlem, farklı boya konsantrasyonlarında, temas süresinde ve pH'da incelenerek sonuçların Langmuir izotermine uygun olduğu belirlenmiştir. Metilen mavisinin giderimi için ananas köklerinin maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 119.05 mg/g olduğu tespit edilmiştir.

Aynı şekilde, özellikle Malezya'da çokça yetiştirilen Jack meyvesi kabuğunun adsorpsiyon potansiyeli, Hameed (2009) tarafından metilen

mavisinin uzaklaştırılması kapsamında araştırılmıştır. Adsorban dozu, başlangıç boya konsantrasyonu, temas süresi ve pH gibi farklı sistem değişkenlerinin etkisi değerlendirilerek adsorban miktarı arttıkça boya uzaklaştırma yüzdesinin de buna bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Deneysel veriler, doğrusallaştırılmış Langmuir izoterminin dört farklı türü, Freundlich izotermi ve Temkin izotermi ile analiz edilmiştir. En iyi uyumun Langmuir modelinden elde edildiği görülmüştür. Metilen mavisinin jack meyvesi kabuğu ile absorpsiyonunun kapasitesi 285.713 mg/g olarak bulunmuştur.

Muz ağacı saplarının adsorpsiyon potansiyeli, Hameed vd. (2008) tarafından incelenmiştir. Sonuç olarak muz saplarının selüloz ve ligninden oluşması sebebiyle yüksek adsorpsiyon kapasitesi (243.90 mg/g) gözlemlenmiştir. Şekil 3, Adsorban olarak kullanılan meyve atıklarına örnekleri göstermektedir.

Tarımsal Kalıntıların Adsorban Olarak Kullanılması

Wang ve diğerleri (2008), pirinç ve buğday kepeğinin Malakit yeşili ve Metilen mavisi olmak üzere iki temel boya üzerindeki adsorpsiyon kapasitesini karşılaştırmıştır. Sonuç olarak, her iki bazik boyanın adsorpsiyonunun pH'a bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Bu işlemdeki adsorpsiyonun, öncelikle adsorban üzerindeki yüzey yükünden ve de çözelti pH'ından etkilendiği görülmüştür. Deneysel bulgular, dört kinetik denklem kullanılarak analiz edilerek Metilen mavisi için olan sonuçların, Langmuir izotermine daha iyi uyum gösterdiği görülmüştür. Freundlich izoterminin ise Malakit yeşili adsorpsiyona daha iyi uyum gösterdiği görülmüştür. Şekil 1, tarımsal kalıntı atıklardan örnekleri göstermektedir. Şekil 4, Adsorban olarak kullanılan tarımsal kalıntılara örnekleri göstermektedir.



Şekil 3. Jack Meyvesi (Solda) ve Muz Ağacı Sapları (Sağdaki İki Görsel)



Şekil 4. Adsorban Özelliğindeki Tarımsal Kalıntı Atıkları

Adsorban olarak ham tarımsal katı atıklar ve talaş gibi orman endüstrilerinden gelen atık maddeler de kullanılmıştır. Bu malzemeler büyük miktarlarda doğada mevcuttur ve fiziko-kimyasal özellikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle adsorban olarak yüksek potansiyele sahiptirler. Talaş, kırsal kesimde maliyetsiz olarak bulunabilen, ağaç endüstrisinden çokça üretilen bir yan ürünüdür. Boyaların farklı mekanizmalarla bağlanmasında faydalı olabilecek polifenolik gruplara sahip çeşitli organik bileşikler (lignin, selüloz ve hemiselüloz) içerir. Sulu çözeltilerden kirleticilerin uzaklaştırılmasında talaş malzemesinin rolü Shukla vd. (2002) tarafından araştırılmıştır. Talaşın, boyaların atıksudan uzaklaştırılması için umut verici derecede etkili bir malzeme olduğu bu çalışma sonuçlarında görülmüştür.

Garg vd. (2004), Malakit yeşilinin sulu çözeltilerden çıkarılması için düşük maliyetli bir adsorban olan Gül ağacı talaşını incelemiştir. Ayrıca, kimyasal arıtmanın etkisini ölçmek ve verimliliğini artırmak için bu çalışmada, talaş, formaldehit ve sülfürik asit ile aktive edilmiştir. Bunun yanı sıra pH, başlangıç konsantrasyonu, adsorban dozu ve temas süresinin etkisini de incelenmiştir. Garg vd. (2004), bu çalışmalarında, 6-10 aralığında bir başlangıç pH derecesinin boya giderimi için uygun olduğunu belirlemişlerdir. Malakit yeşilinin asidik pH'ta düşük adsorpsiyonunun, adsorpsiyon bölgeleri için boya katyonu ile rekabet eden H^+ iyonlarının varlığından kaynaklandığını tespit etmişlerdir.

Dulman ve Cucu-Man (2009), kayın ağacı talaşının sulu çözeltilerde altı reaktif boyanın giderilmesindeki potansiyelini değerlendirmiştir. Yaklaşık %60 saflıkta olan ticari Direct Brown boyasının maksimum adsorpsiyon kapasitesi, 526.3 mg/g olarak bulunmuştur.

Bir tarımsal kalıntı atığı olan yaprak biyokütlesi, çeşitli araştırmacılar tarafından boyaların yanı sıra farklı kirleticiler için alternatif bir adsorban

olarak incelenmiştir (Ponnusami vd., 2009; Han vd., 2007; Immich ve Uilson de Souza, 2009). Bu çalışmalarda, bitki yapraklarının, boya moleküllerini etkili bir şekilde adsorbe edebilen gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Yaprak yüzeyindeki fonksiyonel grupların, zıt yüklü iyonik boya moleküllerini çekebilir ve bu da boya çıkarma veriminin artmasına neden olduğu belirlenmiştir. Ponnusami vd. (2009), sulu çözeltiden metilen mavisinin uzaklaştırılması için adsorban olarak guava yaprak tozunu incelemiştir. Sonuç olarak, Langmuir modelinin deneysel bulguları daha iyi temsil ettiğini ve maksimum boya gideriminin 295 mg/g olduğu belirlenmiştir. Böylece, denedikleri malzemenin (guava yaprak tozu) oldukça etkili ve de bir düşük maliyetli bir adsorban olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Şekil 5, atıkları adsorban olarak kullanılan ağaç türlerini göstermektedir.



Şekil 5. Guava Ağacı (ilk sıra), Kayın Ağacı (ikinci sıra), Anka Ağacı (Üçüncü sıra), Hint Leylağı (Alt Sıra)

Anka ağacı yapraklarının adsorban olarak incelenmesi Han vd. (2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Anka ağacı yaprakları bol miktarda floristik lif, protein ve biyosorpsiyon işlemini mümkün kılan karboksil, hidroksil ve amidojen gibi bazı fonksiyonel gruplar içermektedir. Benzer şekilde hint leylağı yaprağının, Remazol Blue boyasının sulu çözeltisinden uzaklaştırılması için umut verici derecede etkili bir materyal olduğu kanıtlanmıştır (Immich ve Ulson de Souza, 2009).

SONUÇ

Bu çalışmada, çok çeşitli tarımsal atık maddelerin, düşük maliyetli adsorban olarak kullanımına ait potansiyelleri araştırılmıştır. Endüstriyel atıklardan boya giderimi için adsorpsiyon işleminin tarımsal atıklar kullanılarak uygulanması özellikle son yıllarda araştırmacıların ilgisini çeken başlıca konulardan biridir. Bu düşük maliyetli adsorbanlar;

- *Nispeten ucuz veya tamamen maliyetsiz,*
- *Kolayca temin edilebilir (atık malzeme),*
- *Yenilenebilir*
- *Su ortamlarından boyarmadde gideriminde etkili*

olmaları sebebiyle diğer maliyetli adsorbanlara göre (örneğin, aktif karbon) çok daha avantajlıdır.

Biyosorpsiyon prosesi ise daha fazla verimlilik ve geri kazanım için bazı çalışmalarda denenmiş olmakla beraber daha fazla araştırma gerektirmektedir.

Kaynakların etkin kullanımı ve geri dönüşümün büyük önem kazandığı günümüzde tarımsal atıkların değerlendirilmesi de büyük önem arz etmektedir. Doğa ile uyumlu olması nedeniyle sürdürülebilir çevre için, tarımsal atıkların değerlendirilmesi son derece önemlidir.

Dünya nüfusunun hızla arttığı ve artan nüfusun beslenme ihtiyacının karşılanabilmesi için ürün üretiminin arttırılması ve birim alandan daha fazla ürün elde edilebilmesi gerekliliği tarımsal atıkların değerlendirilmesi konusunu daha da önemli hale getirmiştir.

KAYNAKLAR

- A. Shukla, Y.-H. Zhang, P. Dubey, J.L. Margrave, S.S. Shukla. (2002). The role of sawdust in the removal of unwanted materials from water, *J. Hazard. Mater.*, 95, 137–152.
- Achak, M., Hafidi, A., Ouzzani, N., Sayadi, S., Mandi, L. (2009). Low cost biosorbent “banana peel” for the removal of phenolic compounds from olive mill wastewater: Kinetic and equilibrium studies, *Journal of Hazardous Materials*, 166, 1, 117-125.
- Ahmad, R. ve Mondal, P.K. (2008). Application of Acid Treated Almond Peel for Removal and Recovery of Brilliant Green from Industrial Wastewater by Column Operation, *Separation Science and Technology*, 44, 7.
- Allen, S.J ve Koumanova, B. (2003). Decolourisation of water/wastewater using adsorption, *J Univ Chem Technol Metall* 40:175–192.
- Arami, M., Limaee, N.Y., Mahmoodi, N.M., Tabrizi, N.S. (2005). Removal of dyes from colored textile wastewater by orange peel adsorbent: Equilibrium and kinetic studies, *Journal of Colloid and Interface Science*, 288, 2, 371-376.
- Aslan, A. (2020). Badem Kabuğu Ve Kayısı Çekirdeği Kabuğu Kullanılarak Sabit Yataklı Kolonda Adsorpsiyon ile Sulu Çözeltilerden Boyar Madde Giderimi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Aydın, H., Bulut, Y., Yerlikaya Ç. (2008). Removal of copper (II) from aqueous solution by adsorption onto low-cost adsorbents, *Journal of Environmental Management*, 87, 37-45.
- Bagastyo, A.Y., Keller, J., Poussade, Y., Batstone, D.J. (2011). Characterisation and removal of recalcitrants in reverse osmosis concentrates from water reclamation plants, *Water Research*, 45, 7, 2415-2427.
- Barros, A.L., Pizzolato, M., Carissimi, E., Schneider, A.H. (2006). Decolorizing dye wastewater from the agate industry with Fenton oxidation process, *Minerals Engineering*, 19, 1, 87-90.
- Bharathi K.S. ve Ramesh S.T. (2013). Removal of dyes using agricultural waste as low-cost adsorbents: a review, *Applied Water Science*, 3, 773–790.
- Bhatia, D., Sharma N.R., Singh, J., Kanwar, R.S. (2017). Biological methods for textile dye removal from wastewater: A review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47, 19.
- Chung, K.T. (2016). Azo dyes and human health: A review, *Journal of Environmental Science and Health-Part C*, 34, 233-261.
- Çağa, S.E. (2020). Erik Çekirdeği Tozları Kullanılarak Tekstil Boyar Maddesinin Adsorpsiyon Yöntemiyle Giderilmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

- Dogan, M., Abak, H., Alkan, M. (2009). Adsorption of Methylene blue onto Hazelnut shell: kinetics, mechanism and activation parameters. *J Hazard Mater*, 164:172–181.
- Dulman, V. ve Cucu-Man S.M. (2009). Sorption of some textile dyes by beech wood sawdust, *J Hazard Mater*, 162:1457–1464.
- El-Halwany, M.M. (2010). Study of adsorption isotherms and kinetic models for Methylene Blue adsorption on activated carbon developed from Egyptian rice hull (Part II), *Desalination*, 250, 208–213.
- Foo, K.Y. ve Hameed, B.H. (2009). Utilization of rice husk ash as novel adsorbent: A judicious recycling of the colloidal agricultural waste, *Advances in Colloid and Interface Science*, 152, 39–47.
- Garcia, Montano, J., Domenech, X., Garcia-Hortal, J.A., Torrades, F., Peral, J. (2008). The testing of several biological and chemical coupled treatments for Cibacron Red FN-R azo dye removal, *Journal of Hazardous Materials*, 154, 1–3, 484-490.
- Garg, V.K., Rakesh, K, Renuka, G. (2004). Removal of Malachite green dye from aqueous solution by adsorption using agro-industry waste: a case study of *Prosopis cineraria*, *Dyes Pigment*, 62:1–10.
- Gokulan, R., Avinash, A., Prabhu, G.G., and Jegan, J. (2019). Remediation of remazol dyes by biochar derived from *Caulerpa scalpelliformis*—An eco-friendly approach, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, 103297.
- Hameed, B.H. (2009). Removal of cationic dye from aqueous solution using Jack fruit peel as non-conventional low cost adsorbents, *J Hazard Mater*, 162, 1, 344-350.
- Hameed, B.H. ve Ahmad, A.A. (2009). Batch adsorption of Methylene blue from aqueous solution by garlic peel, an agricultural waste biomass, *J Hazard Mater*, 164:870–875.
- Hameed, B.H. ve Daud, F.B.M. (2008). Adsorption studies of basic dye on activated carbon derived from agricultural waste: *Hevea brasiliensis* seed coat, *Chem Eng J*, 139:48–55.
- Hameed, B.H. ve El-Khaiary M.I. (2008a). Sorption kinetics and isotherm studies of a cationic dye using agricultural waste: broad bean peels, *J Hazard Mater*, 154:639–648.
- Hameed, B.H. ve El-Khaiary, M.I. (2008b). Removal of basic dye from aqueous medium using a novel agricultural waste material: pumpkin seed hull, *J Hazard Mater*, 155:601–609.
- Hameed, B.H. ve El-Khaiary, M.I. (2008c). Batch removal of malachite green from aqueous solutions by adsorption on oil palm trunk fibre: equilibrium isotherms and kinetic studies, *J Hazard Mater*, 15, 154(1-3), 237-44.

- Hameed, B.H., Krishni, R.R., Sata, S.A. (2009). A novel agricultural waste adsorbent for the removal of cationic dye from aqueous solutions, *J Hazard Mater*, 162:305–311.
- Hameed, B.H., Mahmood, D.K., Ahmad A.L. (2008). Sorption equilibrium and kinetics of basic dye from aqueous solution using banana stalk waste, *J Hazard Mater*, 158:499–506.
- Han, R., Zou, W., Yu, W., Cheng, S., Wang, Y., Shi, J. (2007). Biosorption of methylene blue from aqueous solution by fallen Phoenix tree's leaves, *J Hazard Mater*, 141:156–162.
- Immich, A.P.S. ve Ulson de Souza A.A. (2009). Removal of Remazol Blue dye from aqueous solutions with Neem leaves and evaluation of their toxicity with *Daphnia magna*, *J Hazard Mater*, 164:1580–1585.
- Kalderis, D., Koutoulakis, D., Paraskeva, P., Diamadopoulos, E., Otal, E., Valle, J. O., Fern'andez-Pereira, C. (2008). Adsorption of polluting substances on activated carbons prepared from rice husk and sugarcane bagasse, *Chemical Engineering Journal*, 144, 42–50.
- Kripanand, N.R. (2021). Adsorption of Textile Industry effluent using carbon black of *Chaetomorpha antennina*, *Journal of Systematic and Innovative Biotechnology*, 1,1, <https://doi.org/10.3695/jsib.v1i1.23>.
- Kule, L. (2014). Elma ve Portakal Kabuğu Üzerine Malaşit Yeşilinin Sulu Çözüldüğü Adsorpsiyonu, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Kusic, H., Bozic, A.L., Koprinarac, N. (2007). Fenton type processes for minimization of organic content in coloured wastewaters: Part I: Processes optimization, *Dyes and Pigments*, 74, 2, 380-387.
- Malik, R., Ramteke, D.S., Wate, S.R. (2007). Adsorption of Malachite green on groundnut shell waste based powdered activated carbon, *Waste Manag*, 27:1129–1138.
- Naiya, T. K., Bhattacharyya, A.K., Mandal, S., Das, S.K. (2009). The sorption of lead(II) ions on rice husk ash, *Journal of Hazardous Materials*, 163, 1254–1264.
- Panizza, M. ve Cerisola, G. (2008). Removal of colour and COD from wastewater containing acid blue 22 by electrochemical oxidation, *Journal of Hazardous Materials*, 153, 1–2, 83-88.
- Piaskowski, K., Świdarska-Dąbrowska, R., Zarzycki, P.K. (2018). Dye Removal from Water and Wastewater Using Various Physical, Chemical, and Biological Processes, *Journal of aoac international*, 101, 5, 1371–1384.
- Ponnusami, V., Gunasekar, V., Srivastava, S.N. (2009). Kinetics of methylene blue removal from aqueous solution using gulmohar *Delonix regia* plant leaf powder: multivariate regression analysis, *J Hazard Mater*, 169:119–127.

- Riano, B., Coca, M., Garcia-Gonzales, M.C. (2017). Evaluation of Fenton method and ozone-based processes for colour and organic matter removal from biologically pre-treated swine manure, *Chemosphere*, 117, 193-199.
- Salihoğlu, Ö. (2020). Pirinç Kabuğu Ve Pirinç Kabuğu Silikası Adsorbanları İle Parlak Yeşil Boyarmaddesinin Adsorpsiyonu: Karakterizasyon Ve Kinetik Çalışmalar, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kimya Anabilim Dalı.
- Salleh, M.A.M., Mahmoud, D.K., Karim, W.A.W.A., Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: a comprehensive review, *Desalination*, 280, (1-3), 1-13.
- Shah, B.A., Pandya, D.D., Shah, H.A. (2016). Impounding of ortho-chlorophenol by zeolitic materials adapted from bagasse fly ash: four factor three level boxbehnken design modelling and optimization, *Arabian J. Sci. Eng.*, 42 (1), 241-260.
- Shukla, A., Zhang, Y.H., Dubey, P., Margrave, J.L., Shukla, S.S. (2002). The role of sawdust in the removal of unwanted materials from water, *J Hazard Mater*, B95:137–152.
- Thinakaran, N., Panneerselvam, P., Baskaralingam, P., Pulikesi, M., Sivanesan, S. (2008). Removal of acid violet 17 from aqueous solutions by adsorption onto activated carbon prepared from sunflower seed hull, *J Hazard Mater*, 154:204–212.
- URL 1, <https://www.enerjiportali.com/biyokutle-enerjisi-atlasi-bepa-yenilendi/>
- Wang, X.U., Zhou, Y., Jiang, Y., Sun, C. (2008). The removal of basic dyes from aqueous solutions using agricultural by-products, *J Hazard Mater*, 157:374–385.
- Xiao, X., Sun, Y., Sun, W., Shen, H., Zheng, H., Xu, Y., Zhao, J., Wu, H., L, u C. (2017). Advanced treatment of actual textile dye wastewater by Fenton-flocculation process, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, <https://doi.org/10.1002/cjce.22752>.
- Wang X.S., Zhou Y., Jiang Y., Sun C.,(2008). The removal of basic dyes from aqueous solutions using agricultural by-products, *Journal of Hazardous Materials*, 157, 2–3, 374-385.
- Yağız, A. (2016). Kivi Kabuğu (Ordu) Kullanılarak Sulu Çözeltilerden Tekstil Boyarmaddelerin Adsorpsiyonu, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Bölüm 10

KENTSEL ÖLÇEKTE ULAŞIM AMAÇLI
BİSİKLET KULLANIMI VE SAĞLIK
AÇISINDAN ETKİLERİ

Hümevra BOLAKAR TOSUN¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Hümevra BOLAKAR TOSUN Aksaray Üniversitesi ORCID ID:0000 0002 6710 2277

Ulaşım; kişi veya eşyanın zaman içinde yer değiştirmesi anlamına gelen bir sistemler bütünü olarak tanımlanmaktadır. Ulaştırma kavramının tarihi, tıpkı insanlık tarihi kadar eskidir. İnsanoğlunun var olduğu ve kaynak ve ihtiyaç bağlantısı ile her yerde ulaşım ihtiyacını doğurmuştur. Malların ve bu malların temin edilmesi için insanlara zaman ve mekan faydası sağlayacak bir biçimde hareketine imkan tanıyan bir taşıma hizmeti oldukça önemli bir faaliyettir. Ulaştırma sistemleri, hem sosyokültürel yapıya olan faydası hem de ülke ekonomisine olan katkısıyla ülkeler için lokomotif vazifesi görmektedir. Bu sebeple doğal kaynakların verimli bir şekilde kullanılması, malların hızlı taşınması, ticaretin geliştirilmesi, ancak etkili bir ulaşım sisteminin uygulanması ile mümkün olacaktır (Akay, 2006).

Tekerleğin icat edilmesi tarihin en önemli icatlarından biri olarak tanımlanmaktadır. Bu icat insanların yaşamını, ateşin kullanılması, buhar gücünün, elektriğin, petrolün ve motorun bulunmasına kadar pek çok durumda etkilemiştir. Buhar gücünün ve elektriğin ulaşım sistemindeki araçlara entegre edilmesi ile de kara, deniz ve hava taşımacılığı ortaya çıkmıştır. Buharın gemilere uygulanması ile gemicilikte yeni bir dönem başlamış, deniz nakliyatında hız, emniyet ve büyük ölçüde kitle taşımacılığında sağlanmıştır. Kısa zamanda dünyanın ham madde bölgeleri üretim merkezlerine bağlanmış ve böylelikle mallar daha ucuz piyasaya sunulmuştur. Demiryollarının ortaya çıkmasıyla ulaşım sektöründe ve sanayinin gelişmesinde yeni bir dönem başlamıştır. Ve ardından ulaşım sektöründe sürekli ve teknolojik yenilikler ile yeni taşıma türleri geliştirilmiştir (Ergün, 1985).

Ekonomik, sosyal ve kültürel bir yaşam için ulaşım en önemli parametrelerden biridir. Ulaştırma sistemlerinin, ülke için öneminde dolayı kaynakların verimli bir şekilde kullanılması, mal ve hizmetlerin hızlı bir şekilde taşınması, iç ve dış ticaretin geliştirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu da ancak ulaşımın dikkatli bir şekilde planlanması ile mümkün olur.

Genel tanımıyla değerlendirilecek olursa ulaşım, insan nüfusunun ihtiyaçlarını sürdürebilmek amacıyla gerçekleştirdiği hareketlilik anlamına gelmektedir. Kent içindeki ulaşım gereksinimi sadece yaya ya da hayvan sırtında bireysel ulaşım olarak gerçekleşebilmesinin yanı sıra, çalışanların topluca işyerine ulaşma ihtiyacı ile ortaya çıkmaya başlamıştır. Söz konusu toplu taşıma ihtiyacı, ilk başlarda atların çektiği arabalarla giderilmiştir. Bu durum aynı zamanda, kentiçi ulaşım türlerinin günümüze kadar gelmesinin başlangıcı olarak nitelendirilebilir (Öncü, 1997). Gelişen ekonomik ve sosyal faaliyetlerle birlikte, ülke nüfusunda artış meydana da gelmiştir. Bu kentsel nüfus oranındaki artış ve kişi başına değerlendirilen gün içerisindeki yolculuk sayılarının artması, toplam kentsel yolculuk sayılarında ciddi oranda artışlar meydana getirmiştir. Bunun sonucunda kentiçi ulaşım

sektörünün gelişimi hızla artmış, gün geçtikçe daha da fazlalaşan kentsel alan olarak nitelendirilen yerlerdeki yolculukların kat ettikleri mesafeleri artmış ve genellikle yaya yolculuğu, motorlu taşıt kullanılarak oluşturulan yolculuğa dönüşmüştür (Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, 1995). Kent içinde ve kent çevresinde birçok ekonomik ya da sosyal faaliyetlerde bulunan insanlar, bütün bunların sonucu olarak da kent içinde motorlu taşıt trafiğini ortaya çıkarmaktadır.

Bir ulaştırma sisteminden en çok beklenen durum, hizmetin en iyi şekilde sunulmasına ilave olarak ekonomik olarak da ucuz bir ulaşım hizmeti sunmasıdır. Bu tanımla vurgulanan şey aslında ulaştırma sistemlerine ait taşıyıcı firma karları değil, enerji kullanımında dışa bağımlılık, trafik kazaları, çevre kirliliği vb. etkilerinin ülke için maliyetini de içeren sosyal maliyet unsurları ile değerlendirilmesi gerektiğidir.

Ulaşım problemi, günümüz dünyasının en önemli sorunlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Kentlerde nüfusun hızla artmasıyla beraber motorlu taşıt kullanımının fazlalaşması ve bunun sonucunda beraberinde getirdiği trafik sorunlarının oluşturduğu bir takım sorunlar ve ayrıca hava kirliliği ve gürültü kirliliği hem insan sağlığını hem de kent yaşantısını olumsuz olarak etkilemektedir. Getirdiği ve oluşturduğu birçok soruna karşın motorlu araç, halkın vazgeçemeyeceği bir ulaşım sistemi halini almıştır. Demokrasiyi kendine rehber alan ülkelerde bile halkın bu aracı kullanımı kent içinde bir takım kısıtlamalara uğratılsa da, bu ulaşım metodunun kullanımının azaltılması, hava kirliliği, akaryakıt sarfı, zaman kaybı açısından yararlı olur.

Ulaşım sektörü, yaklaşık %14'lük bir karbon salınımıyla en fazla karbon salınımı olan sistemler bütünüdür. Karbon ayak izi, birim karbondioksit cinsinden ölçülen, üretilen sera gazı miktarı açısından insan faaliyetlerinin çevreye verdiği zararın ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Ulaşım hareketliliği arttıkça bu tanımlanan zarar yani karbon ayak izi de artar. Bundan dolayı her alan da olduğu gibi ulaşım sektörünün de sürdürülebilir politikalarla desteklenmesi oldukça önemlidir. Burada devreye sürdürülebilir ulaşım tanımı girmektedir. Bahsedildiği üzere sürdürülebilir ulaşım tanımı, bir toplumun hareketlilik ihtiyaçlarını çevreye en az zarar verecek şekilde destekleme kapasitesi olarak ifade edilebilir.

Halka, motorlu taşıtları kullanırmak yerine bisiklet ulaşımı gibi ona tercih edeceği daha rahat alternatifler sunmak gerekir.

Bisiklet ulaşımı, kent içi ulaşım problemlerinde, en önemli çözümlerden biri olarak akla ilk gelen ulaşım türlerinden birisidir. Bisikletin oldukça sağlıklı, güvenli, ekonomik, doğa dostu ve erişilebilirlik açısından son derece kullanışlı olduğu bilinen bir gerçektir. Günümüz dünyasının en önemli sorunlarından olan çevre kirliliği sorununa çözüm olabilecek

bisiklet kullanımını oldukça temiz ve sağlıklı bir ulaşım aracı olarak görül-
mektedir (Akay, 2006; Kaplan ve Ulvi, 2005). Türkiye içinde bisikletin
spor amacıyla yaygın olarak kullanıldığı bir gerçektir. Bunun yanı sıra bi-
sikletin, bir ulaşım aracı olarak da oldukça yaygın olarak kullanılmasının
sağlanması için bazı politikalar geliştirilmelidir. Fakat hala bu kullanım
seviyesi yeterince farkındalığın olmaması ve altyapı yetersizliği sebebiyle
istenilen düzeylerde değildir. Bu konuda bazı uygulamalar ve çalışmalar
olmasına rağmen hala istenilen seviyeye ulaşamamıştır.

Bisiklet kullanımını birçok amaç için gerçekleştirilebilir. Ayrıca ülke-
mizde bisiklet, birçok kişinin boş vakitlerinde sağlık, dinlenme ve sosyal
faaliyet amaçlı olarak kullandığı bir araçtır. Büyük şehirlerde kent içi ula-
şım aracı olarak bisikleti ön plana çıkarmak gerekir. Bunun için de kentsel
ölçekte yönetimlere oldukça önemli görevler düşmektedir.

Bisiklet ve Tarihi

Tarihe bakıldığında ilk olarak bisiklet Fransız asilzadesi tarafından bir
tahtanın iki ucuna birer tekerlek konularak ilk literatüre geçmiştir. Bu ba-
sit araç pedali ve direksiyonu olmayan ve üzerine ata biner gibi binilerek
yürünen bir araç olarak tasarlandı. Ardından 1855 yılında Pierre Michaux
isimli bir Fransız dükü ve oğlu ilk olarak geliştirilmiş yeni tip bir bisiklet
ortada çıkarmışlardır. Bu Fransız ailenin geliştirmiş olduğu bisiklet tasa-
rımı, ön tekerleğin orta göbeğine bir pedal takılarak ve bu pedali ayakla
hareket ettirerek sırasıyla ön tekerleğe ve ardından komple tüm sisteme
hareket verilecek şekilde oluşturulmuştur. Tasarlanan bu alete de şuan kul-
lanılan “Bicycle” ismini vermişlerdir. Bicycle, kısa zamanda çok büyük
ilgi görmüş ilk olarak İngiltere ve ardından tüm Avrupa’ya yayılarak ge-
leşmiştir. 1888 yılına gelindiğinde John Dunlop’un geliştirdiği tahta teker-
leklerin üzerine içi hava ile doldurulmuş lastikler entegre etmesinden sonra
bisiklete binmek artık insanlık için büyük zevk haline gelmiştir. Böylece
bu bir spor halini alıp 1888 yılından sonra da bisiklet sporu büyük önem
kazanmıştır. Sonrasında bisikletler ile yapılan yarışlar insanların ilgi odağı
haline gelmiş ve lastikleri, içi hava dolu lastiklerle sarılı ve çalışma sistem-
leri geliştirilmiş bulunan bisikletler ile yapılan bisiklet yarışları yaygınlaş-
mıştır. Ardından bir duraksama dönemi olmuş fakat 70’li yıllara gelindi-
ğinde bisiklet tekrardan ilgi odağı olmuştur.

1974 tüm dünya üzerinde yaşanan bir enerji krizinden sonra, başkan
Jimmy Carter, ulaşım ekonomisi için bazı çalışmalar yapmış ve konu ile
alakalı araştırma yapılması üzere bir komisyon oluşturmuştur. Bu araştır-
maların ve kurulan bu komisyonun amaçlarından biri, enerji verimliliği
açısından bisikletin kentlerde daha yaygın bir biçimde kullanılmasını teş-
vik etmek ve önemini insanlara bildirmek olmuştur. Bu komisyon araştır-
maları sonucunda ortaya çıkanlar o dönem için oldukça faydalı olmuştur.

Ortaya çıkan sonuçlara göre, kentlerde iş, ticaret, okul gibi günlük ulaşım aktivitelerinin, kişi başına oluşturduğu mesafenin ortalama olarak 6,4 km olduğu tespit edilmiş ve rakamsal değerlendirildiğinde tüm ulaşımın yüzde 40'ını oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda, aynı mesafe otomobil yerine bisiklet kullanılarak yapılırsa hesaplara göre, bir yıl gibi bir zaman diliminde 9,5 milyar litre benzin tasarrufu olacağı vurgulanmıştır. Yani yapılan çalışma ile enerji kullanımı açısından bisiklet kullanımı le boy ölçüşebilecek ulaşım araçlarının, trenler ve büyük gemiler olabileceği sonucuna varılmıştır. Ardından elde edilen bu verilere yol maliyetleri eklenecek yapılan çalışma sonuçları değerlendirildi ve sonuç olarak; bir bisiklet yolunun yapım maliyetinin, normal bir karayolu yapım maliyetinin yüzde 10'una, otoyol yapım maliyetinin ise yüzde 2'sine karşılık geldiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlara, hava kirliliği ve taşıtların her yıl doğaya saldıkları gazlar da ilave edilirse, bisiklet kullanımının önemi ayrıca vurgulanmış olur (Kaynak: Apexbike).

Dünya'da Bisiklet Kullanımı

Dünya üzerinde yılda 1,3 milyon kişi trafik kazasına kurşarak yaşamını yitirmektedir. Trafik kazalarını en aza indirmek için pek çok ülkede bisiklet kullanımının yaygınlaşabilmesi için çeşitli planlamalar ve araştırmalar yapılmaktadır. Özellikle Avrupa da bu hususta önemli planlamalar oluşturulmuştur. Yine Avrupa'nın birçok şehrinde bisiklet, ulaşımın bir parçası olarak kullanılmaktadır. Dünya üzerinde nüfus ve bisiklet sayısı oranına bakıldığında Hollanda nüfusunun yaklaşık yüzde 99'unun bisiklet kullanıldığı biliniyor. Bisiklet kullanımında liderliği kimseye bırakmayan Hollanda aynı zamanda, "Bisikletçiler Ülkesi" olarak da bilinmektedir. Bisiklet konusunda neredeyse her kategoride zirvede yer alan Hollanda'da, günlük kişi başı bisikletle gidilen ortalama mesafede de aynı şekilde en üst seviyede bilinen bir ülkedir. Hollanda'da insanlar bisiklet ile günlük ortalama yaklaşık 3 kilometre yol yapıyor. Hollanda da yalnızca bisiklet kullananlar için ayrı bir yol uygulaması bile mevcuttur ki bu da bisiklet kullanımının teşviki için önemli bir adım olmuştur. Dünya üzerinde bisiklet kullanımı en yaygın olan 10 ülkeden 8 tanesi sadece Avrupa kıtasında yer alıyor. En başta %99 ile Hollanda ve bunu takip eden ülkeler arasında sırasıyla; % 80 ile Danimarka, % 76 ile Almanya, % 64 ile İsveç, %61 ile Norveç, %60 ile Finlandiya, %57 ile Japonya, %49 ile İsviçre, %48 ile Belçika ve % 37 ile Çin gelmektedir. (Kaynak: Apexbike) Dünya ülkelerinde kişi başına bisikletle günlük olarak yapılan mesafeler Şekil 2. de verilmiştir.

Şekil 2. Ülkelerde Kişi Başına Bisikletle Günlük Yapılan Mesafe (Kaynak: TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Şehir İçi Bisiklet Yolları Kılavuzu, 2017)



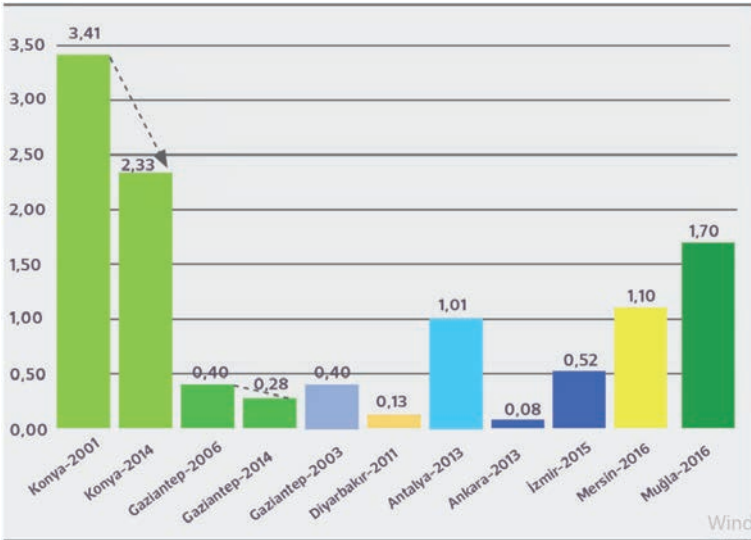
Avrupa’da bisiklet kullanımının yaklaşık yarısı işe ve okula gitmek amaçlı günlük aktiviteler için yapılırken, ABD’de büyük çoğunluk sosyal ve eğlence amaçlı bisiklet kullanmayı tercih etmektedirler. (Lorasokkay ve Ağırdir 2011, Bozkurt 2016). Özellikle Hindistan, Çin, Bangladeş gibi ülkelerde bisiklet kullanım oranı oldukça yüksek seviyelerdedir. Pekin’de iş yolculuklarının yaklaşık yarısı, Tiyenşan’da yaklaşık %70’ ve Şanghay’da yaklaşık %40’ı bisiklet vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Toronto şehrinde yapılan bisiklet yolculuklarının yaklaşık %65’i işe gitmek, %3’ü spor amaçlı ve %16’sı sosyal faaliyetler için yapılmaktadır. Yine Toronto’da bisiklet kullananların %58’i kış mevsimi geldiğinde bisiklet sürmeyi çok tercih etmemektedir. Bisiklet kullanıcıların %18’i bisiklet yolculuklarını motorlu araçlardan ayrılmış ve bisikletliler için özel düzenlenmiş bisiklet yollarında kullanmayı tercih ederken, %23’ü ise bisikletler için özel bir düzenleme olsa bile kendisini motorlu taşıt kullanılan yollarda güvenli hissetmediğini söylemektedirler. Toronto şehrinde total yol ağının %12’si bisiklet kullananlar için düzenlenmiştir ve bisiklet yollarının artırılması için çalışmalar da hızla devam etmektedir. (Aydın 2015, Sarı 2005).

Türkiye’de Bisiklet Kullanımı

Türkiye, sahip olduğu nüfus durumu, doğası ve iklimi nedeniyle bisiklet kullanımına en uygun ülkelerin arasında bulunmaktadır. Toplam nüfus yüzdesinin çoğunluk kısmı kırk yaş altında olan Türkiye, bisiklet kullanımının hitap ettiği yaş kitlesi bakımıyla da büyük bir potansiyele sahiptir. Genç nüfusun fazla olması ülkemiz için avantaj sağlamaktadır. Diğer batı

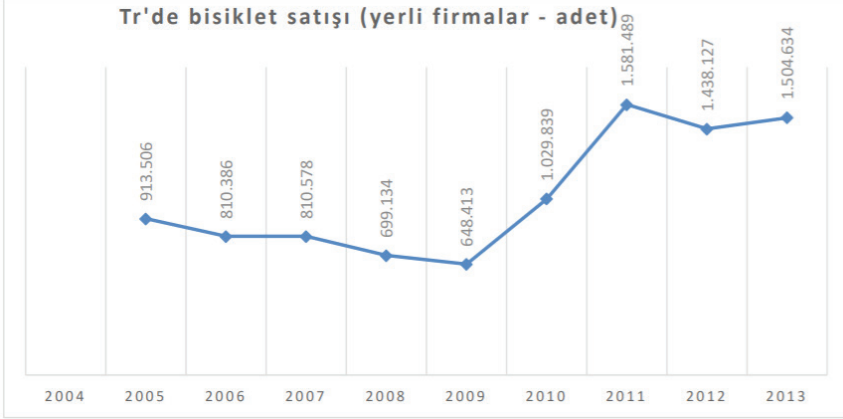
ülkelerinde bisiklet kullanımı, hiçbir zaman çocuklarla sınırlı kalmayıp tüm yaş kitlesi için uygun bir araç olarak kullanılmaktadır. Fakat ülkemizde bisiklet kullanımı, çok kısa bir zamana kadar yaş olarak çocukların oynaması için kullanılan bir oyuncak olarak düşünölmekteydi. Bu sebeple üretim de çocukların kullanımına yönelik olarak tasarlanıyordu. Son dönemlere doğru bisiklet ucuz ve sağlıklı bir ulaşım aracı olarak görölmeye başlandı. Artık bisiklet, sezonluk bir ürün olmaktan çıkıp tüm yaş kitlesi tarafından kullanılmaya başlandı. Bisikletin herkesin kullanabileceği, kısa mesafedeki en hızlı ve saygın bir araç olduğu artık her yaş kitlesi tarafından kabul görmüştür. Fakat son dönemlerdeki artışa rağmen, hala Avrupa ülkelerine oranla Türkiye’de bisiklet kullanımı oldukça düşüktür. Türkiye’deki büyükşehirler için hazırlanan ulaşım ana planlarında, hane halkı anketlerine göre kentlerimizdeki bisikletli yolculuk oranlarının %1-2 seviyelerinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu elde edilen ve gözlemlenen verilere göre ülkemizde en yüksek bisiklet kullanımına sahip il olan Konya’da bile son on üç yıl içinde ortalama 400 km bisiklet yolu yapılmasına rağmen, bisiklet ile yapılan yolculuk oranında %1’lik kadar bir azalma olduğu ortaya çıkmaktadır. Aynı şekilde Gaziantep’te bisiklet kullananların oranları da 2006 yılında %0,40 iken 2014 yılında %0,28 seviyelerine gerilemiştir. Bu rakamlar, ülkemizde özellikle büyükşehirlerde bisiklet kullanımının %1-2 seviyelerini geçmediğini, yani bisikletin ulaşım için çok kullanılmadığını ve giderek kullanımının azaldığını ifade etmektedir (Tablo 1) (Büyükşehirlerin Ulaşım Ana Plan Raporları).

Tablo 1. Ulaşım Ana Planı Konut Anketlerine Göre Bisikletli Yolculuk Oranları



Şekil 3.'te verilen grafikte Türkiye'de 2004 ve 2013 yılları arasındaki bisiklet satış adetleri verilmiştir. (Kaynak: TÜİK, Yıllık Sanayi Ürün İstatistikleri)





Şekil 3. Türkiye'de Bisiklet Satış Adeti



Bisiklet Kullanımı ve Sera Gazı Emisyon İlişkisi

Tüm dünya üzerinde en önemli sorunlardan birisi küresel ısınmadır ve en başta CO₂ ve sera gazı gibi zararlı gazlar üzerine olan çalışmalarda günden güne ciddi oranda artış gözlenmiştir. Literatüre bakıldığında çalışmalar göstermektedir ki sera gazı yayılımında önemli paya sahip sektörlerin en başında ulaşım sektörü gelmektedir. Ulaşımında ilk akla gelen ise tartışılmaz motorlu taşıtlardır. Bugün önemli bir kısmının fosil yakıt kullandığı motorlu taşıtlar, sera gazı emisyonlarını büyük oranda artırmaktadır. Bu nedenle sera gazı emisyonları ve karbon salınımını minimuma indirmek amaçlı bisiklet kullanımı büyük önem taşır. Bisiklet ile gerçekleşen ulaşımın, motorsuz olması, kullanımında herhangi bir yakıtı ihtiyaç duyulmaması ve enerjiyi insan vücudundan alarak çalışması sebebiyle çevre dostu olarak bilinir. Bisikletle ulaşımı, enerji tüketimine bakıldığında, yaya ulaşımının da içinde olduğu tüm ulaşım türleri içinde minimum enerjiyle maksimum yol kat eden ulaşım türüdür. Herhangi bir fosil yakıt kullanılmadığı için de çevre ve havayı kirletmemektedir. Bisiklet aracının benzinle çalışan araçlara kıyasla sera gazı CO₂ salımı 10 kat daha azdır. Farklı türde ulaşım araçlarına göre km başına sera gazı CO₂ salınımı tabloda gösterilmiştir.

Tablo 2. Ulaşım Araçlarının Seyahat Başına Sera Gazı Salımı (Kaynak:European Cyclists' Federation)

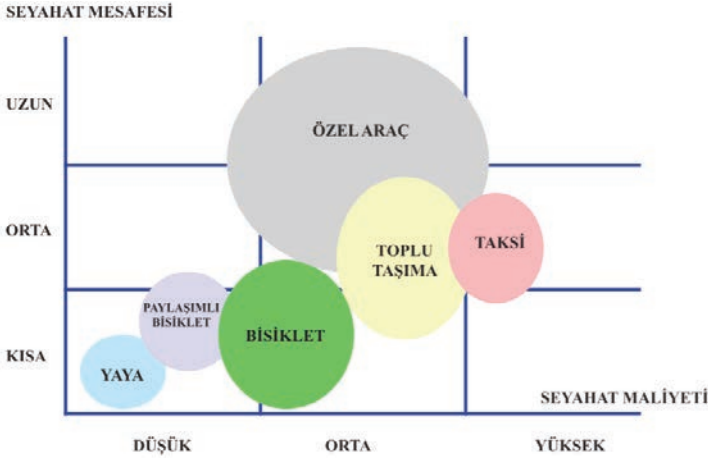
	Bisiklet	21 gr
	Elektrikli Bisiklet	22 gr
	Toplu Taşıma Otobüsleri	101 gr
	Otomobiller	271 gr

Yapılan çalışmalar göre diğer ulaşım türleriyle kıyaslandığında bisiklet, sera gazı salınımının en az olduğu ulaşım aracı olarak belirlenmiştir. Bisiklet aracı bilindiği üzere, hiçbir yakıt kullanmadan sadece sürücünün mekanik gücü ile hareket eden en öncü ulaşım türü olarak bilinmektedir. Bu ulaşım türünün; ulaşım, gezinti veya spor yapmak amacı ile emniyetli bir şekilde kullandığı güzergah ise bisiklet yolu olarak tanımlanır. Bisiklet yolları gün geçtikçe daha fazla ağlara sahip olmakta ve yerel yönetimler bu hususta ciddi yatırımlar yapmaktadırlar. Günümüzde motorlu taşıtlar trafik tıkanmasının ve hava kirliliğinin en önemli nedeni olarak görülmektedir. Bu hususta alternatif en temiz ulaşım türlerinden birisi olan bisiklet günden güne dünyadaki önemli ulaşım araçları arasındaki yerini almıştır.

Ekonomi Bisiklet Kullanımı İlişkisi

Bisiklet kullanımının kısa mesafelerde sağladığı avantajlarda tartışılmazdır. Mesafe maliyet ilişkisine bakıldığında diğer ulaşım türlerine göre açık ara önde gelmektedir.

Şekil 1. Seyahatin Mesafe Maliyet İlişkisi (Translink Public Bike System Feasibility Study, Quay Communications Inc., 2008).



Avrupa ve Amerika da yapılan bazı çalışmalara göre, insanların işlerine veya başka merkezlere ulaşmaları amacıyla en fazla 10 dakikalık yürüme mesafelerine istekli oldukları vurgulanmıştır. Bu zaman diliminde yürüyerek en fazla 2 km mesafe yol alınabilirken; bisiklet kullanarak bu amaçla 8 km'ye kadar yol alınabilmektedir.

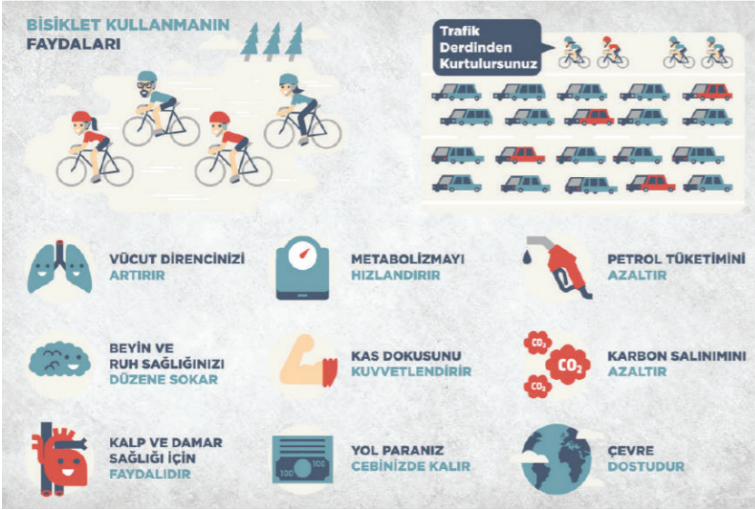
Çevre ve hava kirliliği, trafik ve park etme gibi önemli sorunlara karşı en pratik çözüm olan bisiklet kullanımı, son dönemde Türkiye'de oldukça artmış durumdadır. Artık yalnızca kırsal kesimde değil, şehirlerde de bisiklet kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

BİSİKLET KULLANMANIN SAĞLIK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Bisiklet kullanımı fiziksel kullanım gerektirdiği için sağlık açısından faydası oldukça büyüktür. İnsanların fiziksel olarak aktivitesi, vücut ve iskelet kası tarafından uygulanan bir kuvvet sonucunda tüketilen enerji harcaması olarak tanımlanır. Yürüyüş, türlü sporlar yapmak, bisiklete binmek ve bunun gibi fiziksel olarak enerji sarfı sağlayan aktiviteler insan hareketliliğinin değişik şekilleri olarak değerlendirilir. Günümüz dünyasında ulaşım sistemleri içinde karayolu ulaşımı için özel otomobil kullanımı diğer ulaşım türlerinin kullanımına kıyasla oldukça önde gelmektedir. Maalesef türel dağılımdaki bu dengesizlik yani, otomobil kullanımındaki bu orantısızlık insanların günlük fiziksel aktivite seviyelerinde azalmalara neden olmuştur. ABD'de yapılan çalışmalara göre, hareketsizliğe bağlı olarak oluşan kalp damar rahatsızlıkları, kanser, diyabet gibi birçok sağlık problemleri ilk 10 ölüm nedeni olarak literatüre geçmiştir. (U.S. Department of Health and Human Services, 2010). Dünya geneline bakıldığında,

hareketsizlikten kaynaklanan hastalıklar sebebiyle yaşamını yitiren insan sayısının ortalama 3.2 milyon olduğu düşünülmektedir. Yapılan araştırmalar bisiklet kullanmanın, kalp damar hastalıkları, kanser ve ölüme sebep olan sağlık sorunlarını azalttığı yönünde olmuştur. Bisiklet kullanımının sağlamış olduğu hareketlilik sağlıklı yaşam için çok önemlidir. Bisiklet hem kişisel sağlık giderleri, hem de halk sağlığı giderlerini azaltır. Amsterdam Üniversitesi'nde yapılan bir araştırmaya göre, düzenli bir biçimde haftada 6 km'lik bisiklet yolculuğu yapan bir insanın sağlık durumu ile hiç bisiklete binmeyen ve kendinden 10 yaş genç birinin sağlık durumuna eşit olduğunu göstermektedir (Dutch Ministry of Transport, 1998). Şekil 3.'da bisiklet kullanımına yönelik ortaya çıkan avantajlar ifade edilmiştir.

Şekil 3. – Bisiklet Kullanmanın Faydaları (Kaynak: TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Şehir İçi Bisiklet Yolları Kılavuzu, 2017)



Sonuç ve Öneriler

Bisiklet kullanımında bisiklet yollarının ulaşım ağı ile birlikte birleştirilerek planlanması kentlerde yaşanabilirlik olgusunu artıran ve bisiklet kullanımını destekleyen en önemli faktörlerden birisi olmuştur. Ayrıca kentlerde inşa edilecek yollarda, motorlu araç ve yaya şeritlerine ek olarak yeşil bantlarla dizayn edilmiş bisiklet yolları için yeterli genişliklerin uygulanması kentsel ölçekte çevre hususuna büyük oranda katkı sağlayacağı düşünülmektedir (Uslu vd., 2009).

Bisikleti düzenli olarak insanların spor, doğa, çevre veya sağlık amacı ile kullandığı bilinen bir gerçektir. Bisiklet yolları ve bisiklet kullanımı en başta kazalar ve trafik olmak üzere sağlık üzerine olan etkileri ile son

dönemde oldukça gündeme gelmiştir. Yol alınacak mesafe eğer bisiklet kullanımına uygun ise bireylerin hem fiziksel hem de akıl sağlığını olumlu destekler. Özetle bisiklet kullanımının faydaları şu şekilde sıralanabilir:

1. Güvenli; Araştırmalara göre kazaya karışma durumları ve insan hayatı üzerine yapılan çalışmalar göstermektedir ki; bisiklet sürenlerin ölüm riski motorlu taşıt kullananlara kıyasla 5 kat daha azdır.

2. Ömür Uzatır; Danimarka’da yapılan bir çalışmaya bisiklet kullanmanın, ölüm oranını %40’a kadar düşürdüğü tespit edilmiştir. Ayrıca bisiklet kullanmayı alışkanlık haline getirmiş insanların fiziksel olarak yaptıkları egzersiz ile ömür süreleri arasında sağlam bir orantı vardır.

3. Kalori Yakımını Hızlandırır; bisiklet kullanmak, yürümeye oranla daha fazla kilo kaybına neden olur. Yani ortalama saatte 25 km ile 30 km hızında bisiklet kullanmak yaklaşık olarak 850 kalori kaybına neden olur. Ancak saatte ortalama 6,5 km hızla adım atan bir insan aynı sürede sadece 350 kalori harcarabilir.

4. İnsan Üretkenliğini Artırır; İngiltere’de yapılan bir çalışmaya göre, bisiklet kullanan aktif iş hayatı olan insanların %90’a yakın bir kısmı iş yerinde, bisiklet kullanmayanlara kıyasla daha üretken olduğu gözlemlenmiştir.

5. İyi Bir Egzersiz; Hareket esnasında vücut ağırlığını taşımadığı için diğer sporlardan daha az yorucu bir egzersizdir. Eklemlerinizi fazla zorlamadan egzersiz yapma olanağı sunar.

6. Mutluluk Verir; Yapılan araştırmalara göre sabahları işe giderken bisiklet sürmenin faydalarından biri de diğer ulaşım türlerini kullanan insanlara kıyasla göre daha mutlu olmalarıdır. Araştırma sonuçlarında en mutsuz grup, işe araba kullanarak gidenler olarak belirlenmiştir (<https://www.365gun.com>).

Ülkemizde, her dört kişiden üçünün vücut için gerekli olan fiziksel aktiviteye sahip olmadığı bilinmektedir. Bundan dolayı bazı kurumlar ve iş yerleri, fiziksel aktiviteyi arttırmak için bazı stratejiler geliştirmeli ve bisiklet kullanımını teşvik edici politikalar oluşturmalıdır. Bütün bunlara ek olarak sosyal paylaşım ve etkileşimi güçlendirmesi ile bisiklet sporunun toplum için birleştirici bir araç olarak kullanılmaktadır. Bisikletli ulaşımın artması, bahsettiğimiz üzere, halk sağlığının iyileştirilmesi veya ekonomik kalkınma gibi birçok fayda sağlamaktadır. Bütün bu bahsedilen faydalar için güvenli bisiklet kullanımını sağlayan, uygun tasarlanmış bisiklet yollarının yapılması ve ulaşım için bisiklet kullanımını destekleyen politikalar oluşturulması büyük önem arz etmektedir.

Kaynaklar

- Akay, A. 2006. Ulaşımında Bisikletin Yeri ve Ankara Bilkent Koridorunda Bisiklet Yolu Önerisi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Ergün, İ., 1985. Türkiye'nin Ekonomik Kalkınmasında Ulaştırma Sektörü, Hacettepe Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Yayınları No:10, Ankara.
- <http://www.wikipedia.org/Wiki/bisiklet>, (Erişim tarihi: 08/05/2021).
- <http://www.ibb.gov.tr/tr>, (Erişim tarihi: 1/06/2021).
- <https://apexbikes.cc/> (Erişim tarihi: 20/05/2021).
- <https://docplayer.net/59852320-Translink-public-bike-system-feasibility-study.html>, (Erişim tarihi: 25/05/2021).
- <https://ecf.com/>, (Erişim tarihi: 23/05/2021).
- <https://nationaler-radverkehrsplan.de/sites/default/files/brr-098-1998-en.pdf> (Erişim tarihi: 27/05/2021).
- <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11987364/>, (Erişim tarihi: 23/05/2021).
- <https://tuikweb.tuik.gov.tr>, (Erişim tarihi: 3/06/2021).
- <https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/haberler/b-s-klet-yollari-kilavu-zu-23.12.2019-20191223102511.pdf>, (Erişim tarihi: 3/06/2021).
- <https://www.365gun.com/kolay-egzersiz/bisiklet-ve-bilimsel-faydalari>, (Erişim tarihi: 3/06/2021).
- Kaplan, H. ve H. Ulvi, 2005. AOÇ'de sürdürülebilir ulaşım: bisiklet yolları ve donatılarının planlanması ve tasarımı.
- Lorasokkay, M. A. ve M. L. Ağırır (2011). "Konya kentiçi ulaşımında bisiklet" e-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences 1A0202 / 6:4: 870-881.
- Öncü, E. 1997. Kentiçi Ulaşımında 21. Yüzyıl Perspektifi, Ulaşım – Trafik Kongresi, Ankara, 21-42.
- Ulaştırma Özel İhtisas Komisyonu, "Kentiçi Ulaşım Alt Komisyonu Raporu", T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, 2388-451, Ankara, 2-11, (1995).
- Uslu, C., MF. Altunkasa, O. Boyacıgil ve N. Konaklı, 2009. Adana kuzeybatı üst kentsel gelişme alanında bisikletli bağlantı olanaklarının değerlendirilmesinde çözümlenmeli bir yaklaşım. Ekoloji 18 (70), s. 57-66.

Bölüm 11

**İSTATİSTİKSEL ÖLÇEK İNDİRGEME
YÖNTEMİ UYGULANARAK AYLIK TOPLAM
AÇIK YÜZEY BUHARLAŞMASI
DEĞERLERİNİN TAHMİNİ:
ANTALYA**

*Sefa Nur YEŞİLYURT¹
H. Yıldırım DALKILIÇ²*

1 Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzincan, Türkiye. e-mail: sefa.yesilyurt@erzincan.edu.tr. Orcid no: 0000-0001-6173-3038

2 Doç. Dr. Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye. e-mail: hydalkilic@erzincan.edu.tr. Orcid no: 0000-0002-4405-9341

1. GİRİŞ

Küresel ısınma ve iklim değişikliği tüm canlıları olumsuz etkileyen global bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle iklim değişikliği ve beraberinde görülen olumsuz etkilerin araştırılması önem arz etmekte ve literatürde oldukça büyük bir yer kaplamaktadır. İklim değişikliğinin sebeplerinin ve etkilerinin araştırılıp çözüm bulunması için hükümetler arası paneller düzenlenmekte ve geleceğe yönelik durum tespiti yapılmaktadır. Bu çalışmalardan en önemlisi Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) olarak görülmekte ve bu panel kapsamında Dünya'nın geldiği iklim durumunu değerlendirmek amacıyla 5-7 yılda bir raporlar hazırlanmaktadır. 1990 yılında hazırlanan ilk rapor sonrasında 1995 (FAR), 1996 (SAR), 2001(TAR), 2007 (AR4) ve 2013-2014(AR5) yıllarında raporlar hazırlanmış ve son olarak 6. IPCC değerlendirme raporu (AR6) ise 2015 yılında hazırlanmaya başlanmış ve 2021 yılında tamamlanmıştır (IPCC,2014; IPCC 2021). Tüm bu raporlarda insanların doğaya yapmış oldukları baskının büyüdüğü ve iklim değişikliğinin bu sebeple git gide arttığı vurgulanmıştır (Nacar ve ark., 2019).

İklim değişikliğinin etkilerinin tam olarak belirlenebilmesi için iklim değişikliğini etkileyen tüm parametrelerin tek tek analiz edilmesi ve gelecekteki durumlarının tespit edilmesi gerekmektedir (Daba ve You, 2020; Okkan ve Karakan, 2016; Okkan ve Kırdemir, 2018). Gelecek dönemlere ait iklim parametrelerinin modellenmesinin en etkin yolu iklim modelleme çalışmaları olarak görülmektedir. Bu kapsamda küresel iklim modelleri veya genel dolaşım modelleri (GCM: Global Climate Model) güvenilir modeller olarak görülmektedir. Ancak GCM; iklim modelleri arasında oldukça karmaşık bir yapıya sahip olması ve veri takım çözünürlüklerinin düşük olması sebebiyle tek başına kullanımı tercih edilmeyen modellerdir. Bu model yapısında yerel ölçekte çalışmak mümkün olmadığından bölgesel ölçüğe indirgenerek çalışılması gerekmektedir.

Ölçek indirgeme için temelde dinamik veya istatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri kullanılmaktadır. Dinamik ölçek indirgeme modellerindeki çözünürlükteki artış, modellerin kullanılabilmesi için üst düzey bilgisayar donanımı gerektirmekte ve bu nedenle tercih edilememektedir. Kaba çözünürlüklü atmosferik değişkenler ile gözlem verileri arasında ilişki kurmayı hedefleyen istatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri ise dinamik ölçek indirgeme yöntemlerine göre daha fazla tercih edilen modellerdir. Tercih edilmesine; kullanım kolaylığı, daha düşük bilgisayar donanımı ile uygulanabilmesi, hesaplama verimliliğinin olması, çok sayıda benzeşime olanak vermesi gibi avantajlar sebep olmaktadır. (Daba ve Yu, 2020; Nacar ve ark., 2021). Bu ölçek indirgeme yöntemleri yapay sinir ağları (YSA), regresyon tipleri, destek vektör makinaları gibi birçok teknikte uygulanabilmektedir.

Literatürdeki bu uygulamalar incelendiğinde (Nacar ve ark., 2021) çalışmada yaygın kullanılan Era-Interim re-analiz veri seti ile çalışılarak ölçek indirgeme yöntemi olarak Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (ÇDURE) yöntemi seçilmiştir. Doğu Karadeniz Havzası verileri kullanılan çalışmada Era-Interim verileri ile aylık ortalama sıcaklık değerleri modellenmiş ve model yapısının çok başarılı olduğu görülmüştür. (Kırdemir ve Okkan, 2019) çalışmada yanlılık değerleri Kantil Haritalama (QM), Eş Oran Kantil Haritalama (ERQM), Trendsizleştirilmiş Kantil Haritalama (DQM) ve Kantil Delta Haritalama (QDM) yöntemleri ile düzeltilmiş ve istatistiksel ölçek indirgeme ile yağış projeksiyonlarına uygulanmıştır. (Berissford ve ark., 2011) yapılan çalışmada ise Era 40 ve Era Interim veri setleri ile oluşturulan modeller karşılaştırılmıştır. (Shevnina ve ark., 2021) çalışmada Antartika'daki buzul gölleri üzerindeki buharlaşma değerlerinin tahmini için Era5 veri seti kullanılmıştır. (Lu ve ark., 2021) çalışmada ise 1980-2010 yılları arasındaki buharlaşma verilerinin tahmini üzerine çalışılmıştır. Reliability Ensemble Averaging (REA) yöntemi, seçilen üç veri seti olan ERA5, GLDAS2 ve MERRA2'yi birleştirerek 0.25 derecelik uzamsal çözünürlüğe sahip uzun vadeli (1980–2017) günlük buharlaşma değerlerinin elde edilmesi için kullanılmıştır. Sonuçlar; verilerin ve REA yönteminin buharlaşma tahmini için kullanılabilirliğini göstermektedir. (Vu ve ark. 2015) çalışmada Era-Interim re analiz verilerini ölçek indirgeme için kullanmış ayrıca veri setine günümüz GBM verilerin ekleyerek bu yeni veri setinden türetilen büyük ölçekli tahmin değişkenleri yardımıyla İleri Beslemeli Geri Yayılım algoritması ile (Feed Forward Back Propagation) çalışılmıştır.

Bu çalışmada ise kullanılacak olan istatistiksel ölçek indirgeme yöntemlerinin uygulanabilmesi için gözlem verileri Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü bünyesindeki meteoroloji istasyonlarından elde edilmiştir. Re-analiz verilerine ise beşinci nesil ECMWF yeniden analiz verileri olan ve Era-Interim re-analizinin yerini alan Era5 veri seti yardımı ile ulaşılmıştır. Era5 verilerine ulaşabilmek için Panoply uygulaması kullanılan çalışmada GBM ve Bagged Tree için R- Studio kullanılmıştır. Re-analiz veri setleri, model verilerini gözlemlerle birleştirerek eksiksiz ve tutarlı veri kümeleri oluşturmayı amaçlamaktadır. Küresel olarak tüm bölgelerin verilerine erişilebilen ve özelleştirilerek istenilen bölgede istenilen veri setlerinin kullanılabilmesine olanak sağlayan Era5 Re-analiz verileri; $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ atmosfer verilerine sahiptir (ECMWF, 2021). Bu çalışmada da “ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present” data setinde yer alan atmosferik değişkenlerin aylık toplam açık yüzey buharlaşma verileri ile arasındaki ilişki incelenerek yüksek ilişkiye sahip olan veriler kullanılmış ve Antalya İl’inde bulunan iki meteoroloji istasyonuna ait aylık toplam açık yüzey buharlaşması verilerinin Gradyan

Arttırma Makinesi (Gradient Boosting Machine - GBM) ve Bagged Tree yöntemleri kullanılarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Gradyan arttırma makineleri (Gradient bossting machine-GBM)

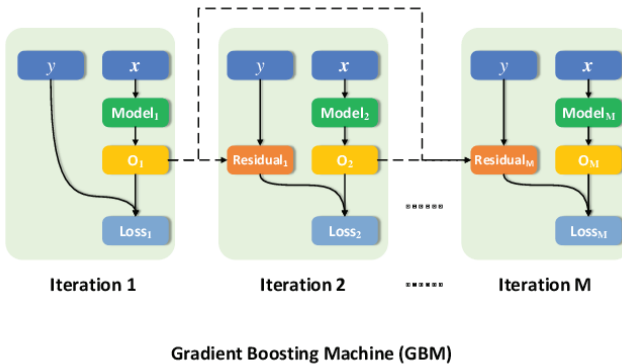
Bir topluluk öğrenme algoritması olan GBM; Freidman tarafından geliştirilmiştir (Freidman ve ark., 2000; Freidman, 2001). Algoritmanın makine öğrenimi ve veri madenciliği çalışmalarında başarılı olduğu birçok çalışma tarafından ortaya konulmuştur (Feng ve ark., 2020; Freidman ve ark., 2000; Freidman, 2001; Ponraj ve Vigneswaren, 2020) İlk olarak tahmin fonksiyonu oluşturulan algoritmada tahmin fonksiyonu ile gözlem fonksiyonu incelenerek kayıp değerleri bulunur. Sonrasında ise tahmin ve kayıp fonksiyonları birleştirilir ve tekrar tahminler ile gözlemler arasında oluşacak fark incelenir. Algoritma bu uygulama ile kayıp değerlerini azaltmayı ve model sonuçlarını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Oluşturulan bu fonksiyonlarda i . gözlem değerleri y_i ; i . tahmin değerleri ise y_i^p ve gözlem sayısı n olarak simgelandiğinde kayıp fonksiyonu denklem 1 ve 2'de verildiği gibi oluşturulur. Model yapısı ise Şekil 1'de verildiği gibi olan algoritma için R-Studio Version 1.4.1103 kullanılmıştır.

$$f(\text{kayıp fonksiyonu}) = \frac{1}{n} \sum (y_i - y_i^p)^2 \quad (1)$$

a ; öğrenme oranı,

$$y_i^p = y_i^p - a * 2 * \sum (y_i - y_i^p) \quad (2)$$

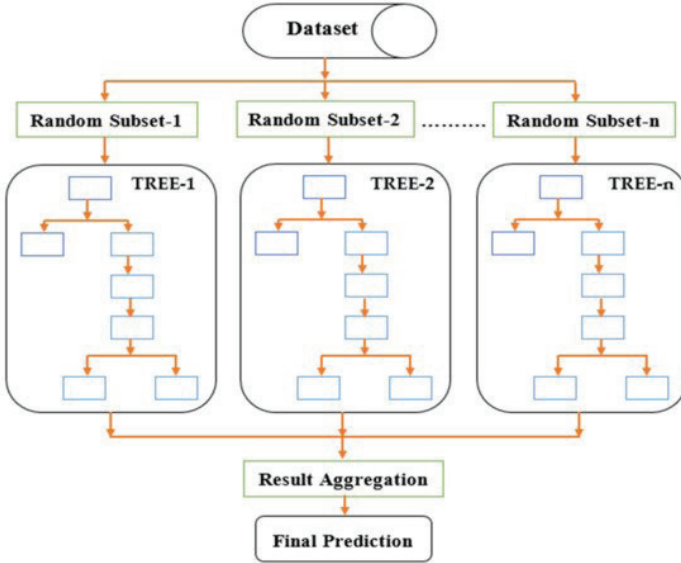
Şeklinde ifade edilir.



Şekil 1. Gradyan Arttırma Makinaları model yapısı (Feng ve ark., 2020).

2.2. Bagged Tree

Aşırı öğrenme sorununu çözmek ve model performansını arttırmak için oluşturulan bir yöntem olan Bagged Tree 1996 yılında Breiman tarafından geliştirilmiş bir algoritmadır (Breiman, 1996). Yöntem örneklem yöntemi ile oluşturulan ağaçların bir araya getirilmesi olarak açıklanabilmektedir. Model uygulaması sırasında ilk olarak orijinal veri setinden çoklu alt örneklem oluşturularak tüm örneklem için temel model yapısı oluşturulmaktadır. Bu modeller birbirlerinden bağımsız ve paralel olarak çalışmaktadırlar. Tüm modellerden elde edilen tahminlerin birleştirilmesi ile nihai tahmin değerleri elde edilen modelin genel yapısı Şekil 2’de gösterildiği gibidir. Algoritma için R-Studio Version 1.4.1103 kullanılmıştır.



Şekil 2. Bagged Tree model yapısı (Saeed ve ark., 2019).

2.3. Hiper parametre Optimizasyonu (Model Tuning)

Makine öğrenmesi, Yapay zekâ teknikleri, derin öğrenme gibi konular üzerinde çalışılırken en iyi model performansının elde edilebilmesi için; model tasarımı sırasında kullanıcının karar vermesi gereken, veri setine ve model yapısına göre değişen parametreler olarak nitelendirilen hiper parametre değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değerler; deneme yanılma yoluyla bulunabilse de kullanıcının tecrübesine, uygulama alanına, model içindeki tasarım bağımlılığına ve veri setine bağlı oldukları için en optimum değerlerinin bulunabilmesi için hiper parametre optimizasyonu gereklidir.

GBM ve Bagged Tree yöntemlerinde de kullanıcıların kararına bağlı olarak değişebilen bazı hiper parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler Tablo 1 ve Tablo 2’de detaylı olarak verilmiştir. Uygulanan hiper parametre optimizasyonu sonrasında aşırı öğrenme (overfitting) sorununun çözülmesi ve model performansının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Tablo 1. GBM Model yapısı için optimizasyonu yapılan hiper parametreler

Hiper parametre	Detay
nteraction.depth	Ağaç başına düşen maksimum düğüm sayısı
n.trees	Ağaç sayısı (çok yüksek bir değer kullanılması aşırı öğrenme sorununu oluşturur)
shrinkage	Öğrenme oranı (küçük veri kümeleri için küçük değerler kullanılırken; büyük veri kümeleri için 0.01 değeri alınabilir)
n.minobsinnode	Ağaçların uç düğümlerindeki maksimum gözlem sayısıdır.

Tablo 2. Bagged Tree Model yapısı için optimizasyonu yapılan hiper parametreler

Hiper parametre	Detay
mtry	Değişken sayısı
ntrees	Ağaç sayısı

2.4. Performans değerlendirme indeksleri

Geliştirilen modellerin performansları R^2 , RMSE, MAE ve NSE olarak isimlendirilen dört performans değerlendirme indeksi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu indeksler aşağıdaki denklemler yardımı ile bulunabilmektedir;

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |y_i - y_j| \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \sum \frac{(y_{model} - y_{gözlem})^2}{(y_{gözlem} - y_{gözlem \text{ ortalaması}})^2} \quad (6)$$

Burada y ölçülen değer, \bar{y} ölçülen değerlerin ortalaması, N toplam data sayısını ifade eder ve bu indekslerden R^2 değeri en iyi 1 değerine, RMSE ve MAE ise en iyi 0 değerine sahip olabilir. Model performans değeren-

dirme indeksleri arasında birbirlerine göre bir üstünlük durumu olmadığı için en iyi model yapısının bulunması güç bir durumdur. Bu nedenle rank analizi uygulanarak en iyi model yapısının oluşturulması amaçlanmıştır. Rank analizi ise; modeller arasından en iyi performans gösteren modelin tüm değerlendirme ölçütleri dikkate alınarak belirlenmesi için uygulanan bir yöntemdir. Modellerin performans değerlendirme puanını belirlemeyi ve en iyi sonucu veren modeli bulmayı amaçlayan yöntem, her bir veri seti için modellere en iyi değere olan yakınlıklarına göre bir sıra ataması ve tüm veri setleri için puanların toplanıp kıyaslama yapılması ile gerçekleştirilir. R_i her bir veri setinin seçilen modelindeki rank değeri ve n model sayısı olarak simgelenirse toplam rank değeri;

$$\text{Modal Total Rank} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (7)$$

Denklemler ile belirlenir (Zhang ve ark., 2020).

3. ÇALIŞMA ALANI, VERİLER VE UYGULAMA

Çalışma kapsamında kullanılan meteorolojik veriler Akdeniz iklimine sahip olan Antalya ili içerisindeki istasyonlardan elde edilmiştir. Antalya ili Türkiye'nin güneybatısında $29^{\circ} 20' - 32^{\circ} 35'$ doğu boylamları ile $36^{\circ} 07' - 37^{\circ} 29'$ kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. İklimsel özelliklerine bakıldığında yıllık ortalama 18.5°C sıcaklığa sahip olan il; yıllık ortalama 1074 mm yağış almaktadır.

Çalışma doğrultusunda Antalya il sınırları içerisindeki tüm meteoroloji istasyonlarına ait veriler incelenerek en uzun süre eksiksiz veriye sahip olan ve Tablo 3'te istatistiksel özellikleri verilen iki meteoroloji istasyonuna ait aylık toplam açık yüzey buharlaşma değerleri kullanılmıştır. Veri setlerindeki eksik değerler lineer regresyon aracılığı ile tamamlanmıştır.

Tablo 3. İstasyonlara ait genel ve istatistiksel bilgiler.

İstasyon kodu	İstasyon	Koordinatlar	Eksik veri sayısı	Toplam veri sayısı	Ortalama buharlaşma	Standart Sapma	Dönem
					mm		yıl
17300	Antalya Havalimanı	$36^{\circ}54'22.68''\text{K} - 30^{\circ}47'56.40''\text{D}$	0	420	151.11	80.04	1985-2019
17974	Gazipaşa	$36^{\circ}16'17.40''\text{K} - 32^{\circ}18'16.20''\text{D}$	2	420	120.87	65.73	

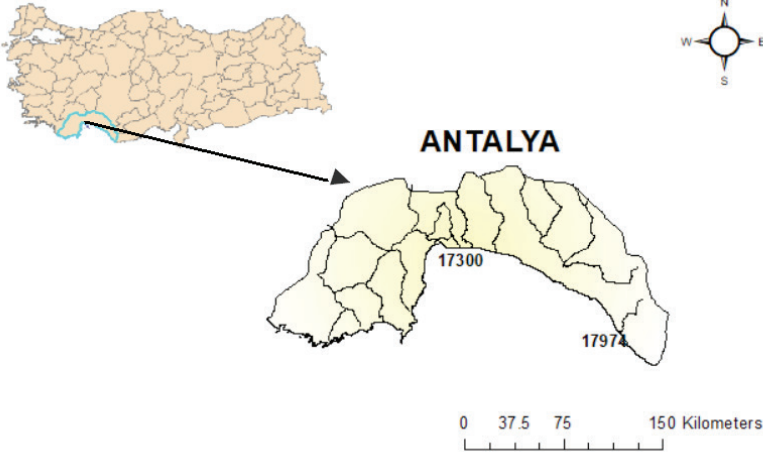
Era5 re-analiz verileri ise “ERA5 Monthly Averaged Data On Single Levels From 1979 To Present” veri seti kullanılarak oluşturulmuş

(ECWMF, 2021) ve bu veri seti içerisinde buharlaşma ile ilişkili olabileceği düşünülen 1985-2019 yılları arası FDIR (yüzeydeki toplam radyasyon değeri), SKT (yüzey sıcaklığı), SP (yüzey basıncı), T2M (2 m sıcaklık), TCC (toplam bulutluluk oranı), TP (toplam yağış), TSR (toplam güneş radyasyonu) ve TTR (toplam termal radyasyon) değerleri kullanılmıştır. Bu verilere ait detaylı bilgiler ECMWF web sayfası aracılığı ile edinilebilmektedir. Tüm verilerin birimlerinin farklı olması; model yapısında bozulmaya sebep olarak model performanslarını olumsuz yönde etkileyecek olduğundan veriler ham haliyle kullanılmamış ve tüm veriler Denklem 8’de verilen yardımı ile standardize edilerek kullanılmıştır. Bu denklemde x seçilen veriyi, x_{ort} verilerin ortalama değerini ve s_x ise verilerin standart sapmasını ifade etmektedir. Standardizasyon işlemi sonucunda ortalaması 0; standart sapması 1 olan veri takımı oluşturulmaktadır.

$$x_s = \frac{x - x_{ort}}{s_x} \quad (8)$$

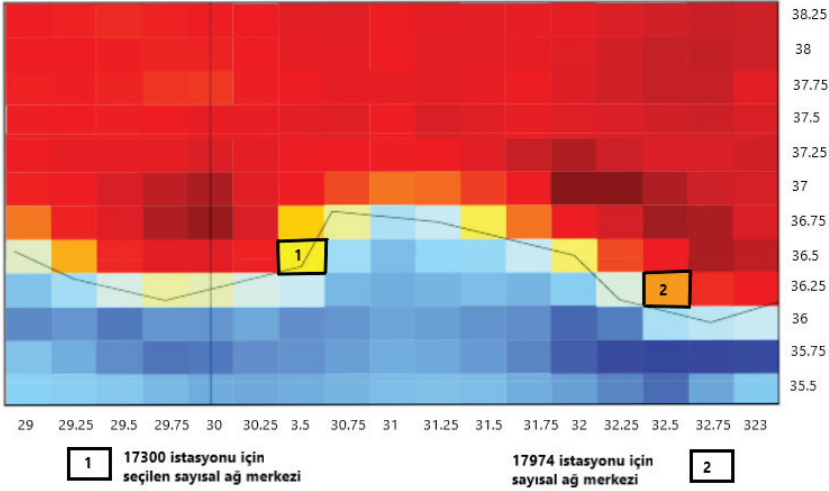
Era5 verilerinin kullanılabilmesi için istasyonlarla eşleşen sayısal ağ merkezlerinin (G) belirlenmesi gerekmektedir. Era5 diğer veri setlerine göre daha yüksek çözünürlükte ve $0.25^\circ\text{C} * 0.25^\circ\text{C}$ olarak verildiğinden her bir istasyon için istasyonun içinde bulunduğu bir grid kullanılmıştır. Bu nedenle 17300 istasyonu için içinde bulunduğu sayısal ağ merkezi olan $30,5/36,5$ gridi seçilirken; 17974 istasyonu için ise içinde bulunduğu sayısal ağ merkezi olan $32,25/36,25$ gridi seçilmiştir. Şekil 3.’de seçilen istasyonların harita üzerinde gösterimi verilirken; Şekil 4.’de ise Panoply uygulaması üzerinden oluşturulan sayısal ağ merkezleri gösterilmiştir.

SEÇİLEN İSTASYONLAR (ANTALYA)



Şekil 3. Seçilen Meteoroloji İstasyonları.

Antalya İli İçin Seçilen Sayısal Ağ Merkezleri (G)



Şekil 4. Sayısal ağ merkezleri (G).

Her bir istasyona ait buharlaşma değerleri (1 ay ve 12 ay sonrası için) ile ERA5 re-analiz verileri arası korelasyon durumu incelenerek Şekil 5.'de gösterilmiştir. Korelasyon durumu 0.8 değerinin üzerinde olan veriler ile farklı veri kombinasyonları denenmiş ve Tablo 4'te gösterilmiştir.

STATION 17033	TE (Meteorological)	SKT	FDIR	SP	T2M	TCC	TP	TSR	TRR
TE (Meteorological)	1	0.824266	0.84552	-0.76441	0.806166	-0.84593	-0.60458	0.793831	-0.85057
SKT	0.824265521	1	0.804769	-0.79597	0.994012	-0.89552	-0.59993	0.747688	-0.95291
FDIR	0.845520351	0.804769	1	-0.84393	0.766267	-0.86666	-0.74629	0.981969	-0.83509
SP	-0.764413085	-0.79597	-0.84393	1	-0.75623	0.706034	0.44655	-0.83698	0.760848
T2M	0.806165695	0.994012	0.766267	-0.75623	1	-0.88465	-0.59434	0.703972	-0.94473
TCC	-0.845929065	-0.89552	-0.86666	0.706034	-0.88465	1	0.733618	-0.79081	0.964665
TP	-0.604580596	-0.59993	-0.74629	0.44655	-0.59434	0.733618	1	-0.72558	0.675102
TSR	0.79383095	0.747688	0.981969	-0.83698	0.703972	-0.79081	-0.72558	1	-0.7495
TRR	-0.850565586	-0.95291	-0.83509	0.760848	-0.94473	0.964665	0.675102	-0.7495	1
STATION 17974	TE (Meteorological)	SKT	FDIR	SP	T2M	TCC	TP	TSR	TRR
TE (Meteorological)	1	0.891679	0.885552	-0.83434	0.878472	-0.8834	-0.67144	0.849768	-0.90903
SKT	0.891678559	1	0.784737	-0.79558	0.996675	-0.89543	-0.64525	0.740579	-0.95933
FDIR	0.88555177	0.784737	1	-0.84664	0.779462	-0.87367	-0.74733	0.990812	-0.83472
SP	-0.8343367	-0.79558	-0.84664	1	-0.77467	0.728565	0.478128	-0.84033	0.789754
T2M	0.878472323	0.996675	0.779462	-0.77467	1	-0.89535	-0.66596	0.735733	-0.95086
TCC	-0.883399282	-0.89543	-0.87367	0.728565	-0.89535	1	0.759901	-0.81826	0.958095
TP	-0.671435269	-0.64525	-0.74733	0.478128	-0.66596	0.759901	1	-0.72264	0.70635
TSR	0.849767811	0.740579	0.990812	-0.84033	0.735733	-0.81826	-0.72264	1	-0.77554
TRR	-0.909025081	-0.95933	-0.83472	0.789754	-0.95086	0.958095	0.70635	-0.77554	1

Şekil 5. Aylık toplam açık yüzey buharlaşma verileri ile ERA5 re-analiz verileri arası korelasyon durumu

Tablo 4. Seçilen veri kombinasyonları

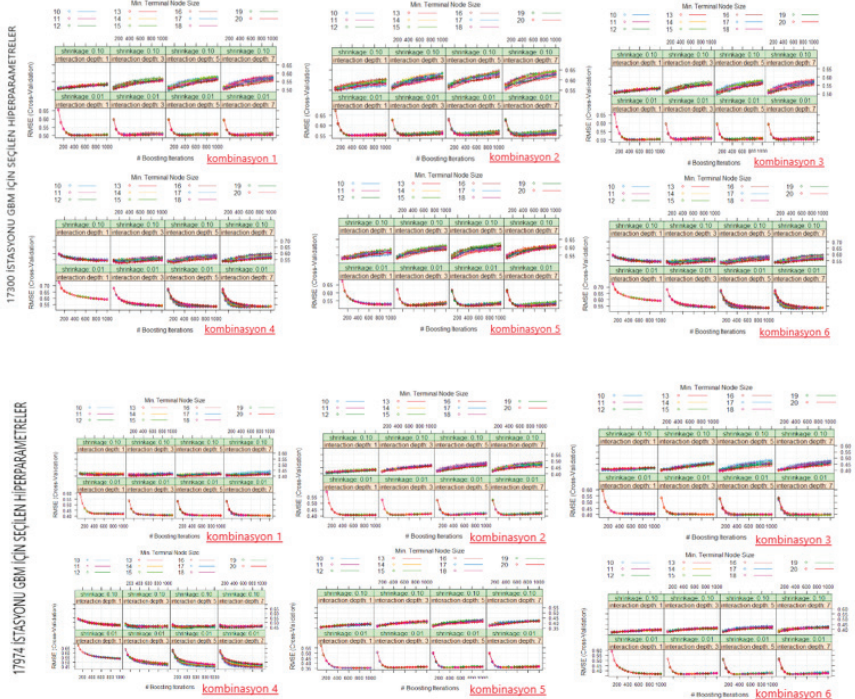
KOMBİNASYON NO	MODEL GİRDİLERİ	MODEL ÇIKTISI
1	SKT+T2M+TRR (t-12)	TE (t)
2	SKT+T2M+TRR (t-1)	TE (t)
3	TSR+ FDIR+TCC (t-12)	TE (t)
4	TSR+ FDIR+TCC (t-1)	TE (t)
5	SKT+FDIR+SP+T2M+TCC+TSR+TRR (t-12)	TE (t)
6	SKT+FDIR+SP+T2M+TCC+TSR+TRR (t-1)	TE (t)

GBM ve SVR algoritmaları kullanılmadan önce verilerin %70'i eğitim, %30'si ise test için ayrılmış ayrıca 10 kat çapraz doğrulama (cross-validation) uygulanmıştır.

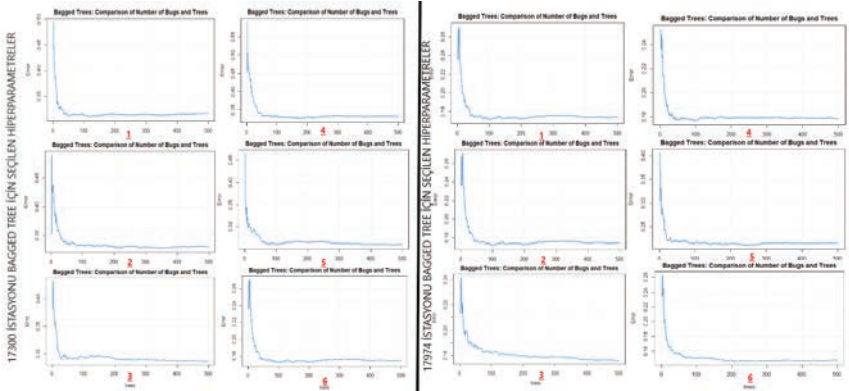
4. BULGULAR

Çalışmada öncelikle eldeki gözlem verilerinin Era5 Re-analiz verileri ile korelasyonu incelenmiş ve aylık toplam açık yüzey buharlaşma verileri ile ilişkisi en yüksek olan veriler (0.8 ve üstü) veriler ile çeşitli kombinasyonlar oluşturulmuştur. Bu kombinasyonlar ile GBM ve Bagged Tree modelleri uygulanarak yöntemler arasında aylık toplam açık yüzey buharlaşma verileri için kıyaslama yapılmıştır. Yöntemlerin daha iyi sonuç verebilmesi ve aşırı öğrenme gibi sorunlar yaşanmaması için hiper parametre optimizasyonu yapılmıştır. GBM yöntemi için en iyi sonuca ulaşılan hiper parametreler Şekil 6 ve 7 de gösterilmiştir. Tüm kombinasyonlar

yonlara ait GBM ve SVR model performans değerleri Tablo 5’te verildiği gibidir.



Şekil 6. GBM optimum hiperparametre değerleri



Şekil 7. Bagged Tree optimum hiperparametre değerleri

Tablo 5. Model performans değerleri

MODEL PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ						
KOMBİNASYON NO	İSTASYON NO	MODEL	RMSE	R ²	MAE	NSE
1	17300	GBM	0.519453	0.716736	0.398928	0.715233
	17974	GBM	0.423776	0.822335	0.336296	0.819
	17300	BAGGED TREE	0.505598	0.7607	0.394981	0.705161
	17974	BAGGED TREE	0.438124	0.808859	0.329096	0.806536
2	17300	GBM	0.483851	0.7731	0.366594	0.76647
	17974	GBM	0.402871	0.828761	0.295109	0.827717
	17300	BAGGED TREE	0.530742	0.720958	0.416888	0.715655
	17974	BAGGED TREE	0.408168	0.823708	0.295338	0.823157
3	17300	GBM	0.482609	0.755698	0.366951	0.754197
	17974	GBM	0.384183	0.855603	0.295347	0.851241
	17300	BAGGED TREE	0.464083	0.774444	0.341762	0.751592
	17974	BAGGED TREE	0.371097	0.863418	0.287394	0.861202
4	17300	GBM	0.50183	0.755943	0.378269	0.748897
	17974	GBM	0.432853	0.80412	0.297945	0.80112
	17300	BAGGED TREE	0.518692	0.737036	0.382241	0.731738
	17974	BAGGED TREE	0.424057	0.814181	0.288758	0.809121
5	17300	GBM	0.479975	0.757211	0.357472	0.756872
	17974	GBM	0.352144	0.877514	0.266943	0.875018
	17300	BAGGED TREE	0.486893	0.749872	0.373584	0.749813
	17974	BAGGED TREE	0.35557	0.874262	0.265685	0.872574
6	17300	GBM	0.464018	0.797907	0.347802	0.785318
	17974	GBM	0.363586	0.865244	0.258551	0.859678
	17300	BAGGED TREE	0.519421	0.737385	0.376676	0.730984
	17974	BAGGED TREE	0.377011	0.850575	0.261143	0.849124

Algoritma sonuçlarını inceleyebilmek için performans değerlendirme indeksleri kullanılmıştır. Ancak model performansını ölçen indeksler arası bir üstünlük olmadığından rank analizi ile model sonuçları ve kombinasyonlar değerlendirilmiştir. En iyi veri kombinasyonunun bulunabilmesi için yapılan rank analizinin model sonuçlarına uygulaması Tablo 6'da verilmiş, en iyi yöntemin bulunabilmesi için yapılan rank analizinin sonuçları ise Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Veri kombinasyonlarına göre rank analizi sonuçları

KOMBİNASYON NO	İSTASYON NO	MODEL	RMSE RANK	R ² RANK	MAE RANK	NSE RANK	TOPLAM RANK
1	17300	GBM	1	1	1	1	27
	17974	GBM	2	2	1	1	
	17300	BAGGED TREE	4	5	2	1	
	17974	BAGGED TREE	1	1	2	1	
2	17300	GBM	3	5	4	5	47
	17974	GBM	3	3	4	3	
	17300	BAGGED TREE	1	1	1	2	
	17974	BAGGED TREE	3	3	3	3	
3	17300	GBM	4	2	3	3	70
	17974	GBM	4	4	3	4	
	17300	BAGGED TREE	6	6	6	6	
	17974	BAGGED TREE	5	5	4	5	
4	17300	GBM	2	3	2	2	36
	17974	GBM	1	1	2	2	
	17300	BAGGED TREE	3	2	3	4	
	17974	BAGGED TREE	2	2	3	2	
5	17300	GBM	5	4	5	4	83
	17974	GBM	6	6	5	6	
	17300	BAGGED TREE	5	4	5	5	
	17974	BAGGED TREE	6	6	5	6	
6	17300	GBM	6	6	6	6	74
	17974	GBM	5	5	6	5	
	17300	BAGGED TREE	2	3	4	2	
	17974	BAGGED TREE	4	4	6	4	

Tablo 7. Yöntemlere göre rank analizi sonuçları

KOMBİNASYON NO	İSTASYON NO	MODEL	RMSE	RMSE RANK	R ²	R ² RANK	MAE	MAE RANK	NSE	NSE RANK
1	17300	GBM	0.519453	1	0.7167357	1	0.3989282	1	0.715233	2
	17974	GBM	0.423776	2	0.8223345	2	0.3362964	1	0.819	2
	17300	BAGGED TREE	0.505598	2	0.7606999	2	0.3949805	2	0.705161	1
	17974	BAGGED TREE	0.438124	1	0.8088594	1	0.3290957	2	0.806536	1
2	17300	GBM	0.483851	2	0.7731	2	0.3665943	2	0.76647	2
	17974	GBM	0.402871	2	0.828761	1	0.295109	2	0.827717	2
	17300	BAGGED TREE	0.530742	1	0.7209576	1	0.4168875	1	0.715655	1
	17974	BAGGED TREE	0.408168	1	0.8237082	2	0.2953384	1	0.823157	1
3	17300	GBM	0.482609	1	0.755698	1	0.3669508	1	0.754197	2
	17974	GBM	0.384183	1	0.855603	1	0.295347	1	0.851241	1
	17300	BAGGED TREE	0.464083	2	0.7744442	2	0.3417618	2	0.751592	1
	17974	BAGGED TREE	0.371097	2	0.8634181	2	0.2873944	2	0.861202	2
4	17300	GBM	0.50183	2	0.755943	2	0.3782686	2	0.748897	2
	17974	GBM	0.432853	1	0.8041202	1	0.2979453	1	0.80112	1
	17300	BAGGED TREE	0.518692	1	0.737036	1	0.3822407	1	0.731738	1
	17974	BAGGED TREE	0.424057	2	0.8141811	2	0.2887584	2	0.809121	2
5	17300	GBM	0.479975	2	0.7572113	2	0.3574724	2	0.756872	2
	17974	GBM	0.352144	2	0.8775141	2	0.2669434	1	0.875018	2
	17300	BAGGED TREE	0.486893	1	0.749872	1	0.3735843	1	0.749813	1
	17974	BAGGED TREE	0.35557	1	0.8742618	1	0.2656846	2	0.872574	1
6	17300	GBM	0.464018	2	0.7979074	2	0.3478021	2	0.785318	2
	17974	GBM	0.363586	2	0.8652444	2	0.2585511	2	0.859678	2
	17300	BAGGED TREE	0.519421	1	0.737385	1	0.3766756	1	0.730984	1
	17974	BAGGED TREE	0.377011	1	0.8505745	1	0.2611432	1	0.849124	1
			GBM TOPLAM RANK			BAGGED TREE TOPLAM RANK				
			79			65				

Elde edilen sonuçlar 5. Veri kombinasyonunun model performansının daha iyi olduğunu ve GBM modelinin Bagged Tree modelinden daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Ayrıca tüm sonuçlara bakıldığında yeterli kabul edilen 0.7 R² ve NSE değerlerinin üzerinde sonuçlar elde edildiği ve modellerin iyi sonuç verdiği görülmektedir.

5. SONUÇ

Çalışmada yüksek çözünürlüklü ve yeni bir veri seti olan Era5 Re-analiz verileri (küresel ölçekli atmosferik değişkenler); Meteorolojik gözlem verilerinden aylık toplam açık yüzey buharlaşması değerlerinin modellenmesi için kullanılmış ve ölçek indirgemesi yapılmıştır. Antalya ilinde bulunan ve en uzun süreli - en az eksikçe sahip olan 17300 ve 17974 istasyonlarına ait sıcaklık verileri için 1 ay ve 12 ay önceki Era5 verileri kullanılarak güncel aylık toplam açık yüzey buharlaşması değerlerinin tahmin edilmesi sağlanmıştır. Çalışmada; Gradyan Arttırma Makineleri ve Bagged Tree yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında Era5 re-analiz verilerinin yerel ölçekte karşılığının belirlenmesinde başarılı olduğu görülmüştür.

Çalışmanın ilk aşamasında verilerdeki eksiklikler lineer regresyon yöntemi ile tahmin edilmiş sonrasında atmosferik değişkenler ile yerel ölçekteki aylık toplam açık yüzey buharlaşma değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Korelasyon değerlerine bakılarak çeşitli veri kombinasyonları oluşturulmuştur. Modeller oluşturulurken aşırı öğrenme sorununun olmaması ve daha iyi sonuç alınabilmesi için hiper parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar en yaygın kullanılan ve doğruluğu birçok çalışmada gösterilen performans değerlendirme indeksleri ile değerlendirilmiş ve en iyi sonucun bulunabilmesi için rank analizi uygulanmıştır.

Elde edilen model sonuçlarına bakıldığında 12 ay önceki SKT, FDIR, SP, T2M, TCC, TSR ve TRR atmosferik verileri ile mevcut toplam açık yüzey buharlaşması tahmininin iklimsellik etkisinin ortadan kalkması ile en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. 1 ay önceki verileri kullanımı ile oluşturulan model yapılarında ise mevsimler arası geçiş gibi etkenlerin buharlaşma değerlerinde oluşturacağı ani farklılıkların model performansını olumsuz etkilediği görülmüştür. Ayrıca GBM ve Bagged Tree yöntemleri kıyaslandığında GBM modelinin çok daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bu durum Bagged Tree gibi temel öğrencileri kullanan regresyon ağaçlarının zayıf öğrencilerini birleştirerek güçlü öğrencili bir model yapısı oluşturmaya çalışan GBM modelinin amacında başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca uygulanan hiper parametre optimizasyonu sayesinde hiçbir modelde aşırı öğrenme sorununa rastlanmamıştır.

Bu çalışma Era5 re-analiz verilerinin istatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri ile kullanımının iyi sonuç verdiğini kanıtlamaktadır. Çalışma Antalya ili aylık toplam buharlaşma değerlerinin tahmini için Era5 verileri ile ölçek indirgeme yapılan ilk çalışma özelliği taşımaktadır. Ayrıca çalışmanın daha büyük çaplı, daha büyük veri setleri ile daha büyük alanlarda uygulanacak olan çalışmalar için altlık sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Berrisford, P., Kållberg, P., Kobayashi, S., Dee, D., Uppala, S., Simmons, A. J., ... & Sato, H. (2011). Atmospheric conservation properties in ERA-Interim. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(659), 1381-1399.
- Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine learning*, 24(2), 123-140.
- Daba, M. H., & You, S. (2020). Assessment of climate change impacts on river flow regimes in the upstream of Awash Basin, Ethiopia: based on IPCC fifth assessment report (AR5) climate change scenarios. *Hydrology*, 7(4), 98.
- ECMWF. (2021, Haziran 10). The family of ERA5 datasets. <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/The+family+of+ERA5+datasets>.
- Feng, J., Xu, Y., Jiang, Y., & Zhou, Z. (2020). Soft Gradient Boosting Machine. *ArXiv, abs/2006.04059*.
- Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 1189-1232.
- Friedman, J., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2000). Additive logistic regression: a statistical view of boosting. *Ann. Stat.*, 28, 337-407. doi: 10.1214/aos/1016218222.
- IPCC . (2021). AR6 Climate Change- The Physical Science Basis. IPCC. (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>).
- IPCC. (2014), AR5 Climate Change 2014:. IPCC. (<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>).
- Kırdemir, U., & Okkan, U. (2019). Farklı yanlılık düzeltme yöntemlerinin istatistiksel ölçüğe indirgenmiş yağış projeksiyonlarına uygulanması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 868-881.
- Lu, J., Wang, G., Chen, T., Li, S., Hagan, D. F. T., Kattal, G., ... & Su, B. (2021). A Harmonized Global Land Evaporation Dataset from Reanalysis Products Covering 1980–2017. *Earth System Science Data Discussions*, 1-28.
- Nacar, S., Kandal, M., & Okkan, U. (2021). EraInterim Re-analiz Verileri Kullanılarak İstatistiksel Ölçek İndirgeme Yöntemi ile Doğu Karadeniz Havzası Aylık Ortalama Sıcaklık Değerlerinin Tahmin Edilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(1), 136-148. doi:<https://doi.org/10.21324/dacd.700144>.
- Nacar, S., Kandal, M., Okkan, U. & Dede T. (2019). İstatistiksel Ölçek İndirgeme Yöntemi ile NCEP/NCAR re-analiz Verilerinin Doğu Karadeniz Havzası Aylık Yağış ve Sıcaklık Değerlerine İndirgenmesi. *Conference: International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering (iSTE-CE'2019)*.

- Okkan, U., & Karakan, E. (2016). İklim Değişikliğinin İkizcetepeler Barajı Akımlarına Etkilerinin Modellenmesi: 2015-2030 Projeksiyonu. *İMO Teknik Dergi*, 7379-7401.
- Okkan, U., & Kirdemir, U. (2018). Investigation of the behavior of an agricultural-operated dam reservoir under RCP scenarios of AR5-IPCC. *Water resources management*, 32(8), 2847-2866.
- Saeed, M. S., Mustafa, M. W., Sheikh, U. U., Jumani, T. A., & Mirjat, N. H. (2019). Ensemble bagged tree based classification for reducing non-technical losses in multan electric power company of Pakistan. *Electronics*, 8(8), 860.
- Shevnina, E., Potes, M., Vihma, T., Naakka, T., Dhote, P. R., & Thakur, P. K. (2021). Evaporation over glacial lakes in Antarctica. *The Cryosphere Discussions*, 1-33.
- Ponraj, A. S., & Vigneswaran, T. (2020). Daily evapotranspiration prediction using gradient boost regression model for irrigation planning. *The Journal of Supercomputing*, 76(8), 5732-5744.
- Vu T., Aribarg T., Supratid S., Raghavan S. (2015). Statistical downscaling rainfall using artificial neural network: significantly wetter Bangkok?, *Theoretical and Applied Climatology*.126(3-4), doi: 10.1007/s00704-015-1580-1.
- Zhang, H., Zhou, J., Jahed Armaghani, D., Tahir, M., Pham, B., & Huynh, V. (2020). A Combination of Feature Selection and Random Forest Techniques to Solve a Problem Related to Blast-Induced Ground Vibration. *Appl. Sci.*, 10 (3), 869. doi:<https://doi.org/10.3390/app10030869>.

Bölüm 12

ATIK CAM VE OBSİDİYEN KULLANILARAK AGLOMERA TAŞI ÜRETİMİ

Hakan ELÇİ¹

Çetin YEŞİLOVA²

Ramazan HACIMUSTAFAOĞLU³

İlker ÖZKAN⁴

1 0000-0003-2945-2548-Hakan Elçi, Doç. Dr. DEÜ, Torbalı Meslek Yüksekokulu, Geoteknik Programı, İzmir, Türkiye

2 0000-0002-8884-0842-Çetin Yeşilova, Dr. Öğr. Üyesi. YYÜ, Müh. Fak., Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

3 0000-0002-2054-6559-Ramazan Hacimustafaoğlu, Öğr. Gör. Dr. DEÜ, TMYO, D. Y. Taşları Tek. P. İzmir, Türkiye

4 0000-0002-7506-5795- İlker Özkan, Doç. Dr. DEÜ, TMYO, Endüstriyel Cam ve Seramik Programı, İzmir, Türkiye

1. Giriş

Obsidiyen, çoğunlukla asidik özellikli magmanın ani soğuması ile oluşmuş bir volkanik camdır. Genellikle riyolit bileşimli, siyah veya koyu renkli ve konkoidal kırılma şekli ile karakteristiktir. Nadiren bantlı bir yapıya sahip olabilir ve mikrolit içerebilir (Neuendorf, Mehl, ve Jackson, 2011). Anadolu'da genç volkanların yakınlarında, Tersiyer ve Kuvaterner yaşlı volkanizmanın etkin olduğu bölgelerde zengin obsidiyen yatakları oluşmuştur. Bu yataklar, Doğu Anadolu'da Süphan, Nemrut, Tendürek ve Ağrı, dağı, Orta Anadolu'da ise Hasandağ ve Erciyes dağı gibi genç büyük yanardağların çevrelerinde, gerek büyük lav akıntıları şeklinde, gerekse aglomeralar ve tüfler içerisinde, farklı boyutlarda parçalar halinde bulunmaktadır (Ercan, Yeğingil, Bigazi, Oddone, Özdoğan, 2010).

Prehistorik çağlarda insanlar tarafından, takı, ayna ve dekoratif eşya olarak kullanılmalarının yanı sıra kırıldıkları zaman, normal camlar gibi ince ve çok keskin kenarlı yüzeylere sahip olması nedeniyle obsidyenler kesici, delici alet yapımında (Doğanay, Altaş, 2013) hatta ameliyat bıçağı olarak kullanılmışlardır (Akbulut, 2016). Diğer doğal materyallere göre kullanımındaki üstünlük ve çevrede yaygın olarak bulunması nedeniyle ilkel topluluklar arasında belirli kaynaklardan geniş ölçüde ticareti de yapılmıştır (Ercan, Yeğingil, Bigazi, Oddone, Özdoğan, 2010). Günümüzde arkeolojik kazılarda bulunan obsidiyen objelerin, yapılan arkometrik çalışmalar ile hangi bölgeye ait obsidiyen yataklarından temin edildiği saptanabilmektedir. Bu bilgi sayesinde arkeologlar, yazının olmadığı Prehistorik çağlarda bölgeler arası ilişkileri obsidyen üzerinde yapılan bu analizler sonucunda saptayabilmektedir (Güngördü, 2013).

Günümüzde, obsidiyene yarı değerli süs taşı atfedilmiştir. Obsidiyenler, yüzlek verdiği bölgelerde küçük işletmeler tarafından tespih, yüzük, küpe, kolye, spa taşı, plaket, isimlik gibi küçük boyutlu objelerin üretiminde kullanılmaktadır (Doğanay, Altaş, 2013; Demir, 2017). Ham madde olarak sınırlı bir kullanımı vardır. Bunun sebebi obsidiyenin genellikle birkaç dm, çok nadiren metre mertebesinde boyutlarında kütleler halinde bulunmasıdır. Ayrıca camsı yapısı nedeniyle oldukça sert ve darbeye karşı dayanıksızdır. Bu nedenle bir doğal taş gibi levha, plaka haline getirilmemektedir. Bu ve benzer özellikleri nedeniyle, diğer doğal taşlar gibi yapı malzemesi olarak geniş bir kullanım alanı bulamamıştır.

Endüstriyel cam, ergime sıcaklığı yüksek olan (≈ 1700 °C) kuvars kumuna soda ve kireç eklenmesi ile ergime sıcaklığını yaklaşık 1000 °C'ye düşürülmesi ile elde edilir. Elde edilen bu cam, pencere camı, şişe ve aydınlatma ürünleri gibi ihtiyaçlar için kullanılır (Akbulut, 2010). Genellikle kristalleşmeden soğutulmuş inorganik bir füzyon ürünü olan cam, amorf bir yapıya sahip olduğundan, kristallerle karşılaştırıldığında, yapısı, peri-

yodik bir kafeste düzenli atom dizilişinden yoksundur. Endüstriyel üretime uygun camların bileşimi, erime davranışı, şekillendirilebilirlik, uygun nihai özellikler ve kabul edilebilir fiyat gibi parametrelerle sınırlıdır. Örneğin, kuvars camı birçok açıdan olağanüstü özellikler gösterir, ancak yüksek erime sıcaklığı nedeniyle üretimi çok maliyetlidir. Erime sıcaklığı, alkali oksitlerin (Na_2O) eklenmesiyle düşürülebilir, ancak elde edilen alkali silikat camlar, su ve atmosferik nemin etkilerine karşı zayıf direnç gösterir. Kimyasal dayanıklılık, diğer oksitlerin (CaO) varlığıyla iyileştirilir. Bu nedenler ile mevcut endüstriyel camların bileşimi SiO_2 - CaO - Na_2O sisteminden türetilmiştir. Tipik bir soda-kireç-silika camı ağırlıkça yaklaşık % 70 SiO_2 içerir, geri kalan kısmını da esas olarak Na_2O (soda) ve CaO (kireç) oluşturur. Bu camların, normal pencere camları gibi düz camlar, cam kaplar ve aydınlatma ürünleri gibi yerlerde kullanım alanları bulunmaktadır (Hvaláč, 1983; Eppler ve Eppler, 2000; Callister, 2007).

Endüstriyel cam tamamen geri dönüşebilen bir malzemedir. Fakat ülkemizde birçok atıkta olduğu gibi geri dönüşüm farkındalığının yaygın olmaması ve kaynağında ayrıştırmanın yeterince yapılmaması nedeniyle endüstriyel cam atıkların geri dönüşüm oranı oldukça düşüktür 2019 yılında üretilen ve iç piyasaya sürülen cam ambalaj miktarı 871 bin ton'dur. Bu miktarın geri kazanım oranı ise % 32'dir (Pagçev, 2019). Bu cam ambalajlar kullanım sonrası kaynağında ayrıştırılmadığı için geri dönüştürülememekte ve atılmaktadır.

Birçok inorganik atığın yeniden kullanılmasında bilinen en iyi çözüm hiç şüphesiz beton üretiminde kısmen agrega ile yer değiştirilerek kullanılmasıdır. Bu atıklar; başta inşaat ve maden atıkları olmak üzere, demir çürufu, tuğla seramik atıkları, kül atıklar ve hatta araç lastikleri, pet şişe, plastik gibi atıklardır. Fakat hem endüstriyel cam hem de obsidiyen, beton üretiminde agrega olarak kullanıldıklarında, alkali silika reaksiyonuna (ASR) neden olduğundan tercih edilmezler. Bu nedenle gerek endüstriyel cam gerekse obsidiyenin, yapı malzemesi üretiminde agrega kaynağı olarak kullanılması durumunda, portland çimentosundan farklı bir bağlayıcıya ihtiyaç duyulur.

Atık malzemelerden kaplama yapı malzemesi üretimine yönelik çalışmalar daha çok doğal taş atıklarının, bağlayıcı olarak portland çimentosu ile birlikte kullanılarak geri kazanımı üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalar içerisinde nadiren de olsa polyester veya epoksi gibi kimyasal bağlayıcılar kullanılarak yapılmış çalışmalar mevcuttur.

Çelik ve Emrulloğlu 1999, yaptıkları çalışmada, mermer atıklarını, polyester bağlayıcı kullanarak birleştirip, kaplama malzemesi elde etmişlerdir. Yaptıkları analizlerde elde ettikleri ürünün özelliklerinin, bir doğal taşa yakın olduğunu, bazı özelliklerinin ise daha da iyi olduğunu rapor etmişlerdir.

Ming, Chun, Fang, Shang, Jyh, Ming, ve Jeng 2008, % 40 atık cam tozu, % 60 ince granit agregası karışımına bağlayıcı olarak % 8'lik polimer reçinesi ekleyerek hazırladıkları karışımı 15 MPa'lık bir basınç altında ek olarak titreşim ve vakum uygulayıp yapay taş plakaları üretmişlerdir. Ürettikleri bu yapay taşın yoğunluğunu 2.445 kg/m^3 , su emme değerini % 0,02, basınç dayanımını 150 MPa ve eğilme dayanımını 51 MPa olarak belirlemişlerdir.

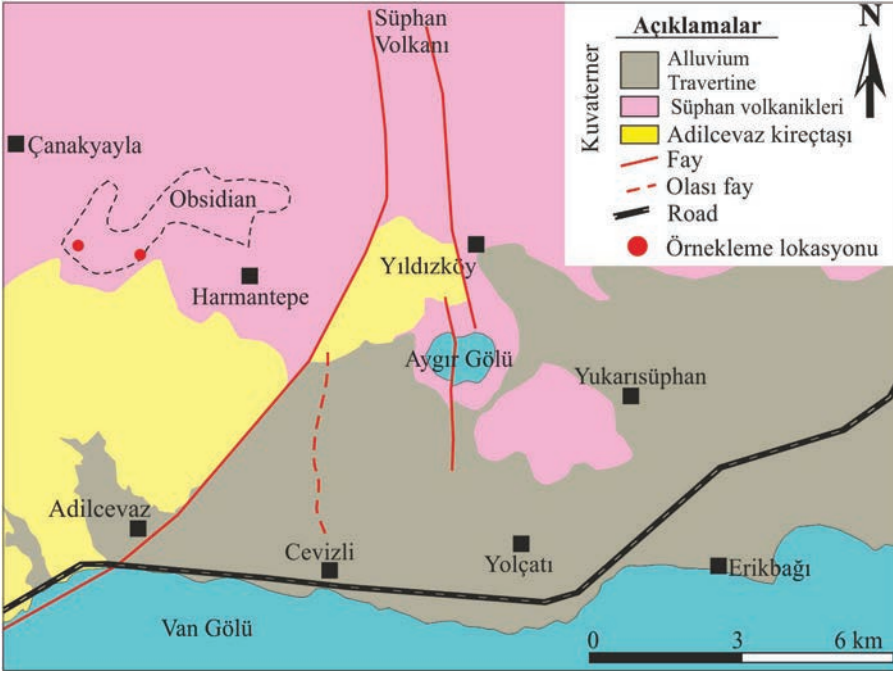
Sevinç ve Durgun, 2021, radyasyon absorblamak amacıyla farklı miktarlarda atık talaş, atık PVC talaşı, yumurta kabuğu ve vermikülit epoksi bağlayarak kompozit malzeme üretmişlerdir. Elde ettikleri Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri genel amaçlı ahşap esaslı kompozitlerden daha düşüktür. Bununla birlikte, yumurta kabuklarının eklenmesi mekanik özellikleri iyileştirmiştir. Vermikülit ilavesi, radyasyon absorpsiyon kapasitesine biraz artırsa da özellikle, yumurta kabuklarının gama radyasyon kalkanı için bir katkı maddesi olarak kullanılabilceğini ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada malzeme özellikleri oldukça birbirine yakın olan atık durumundaki evsel camlar (şişe), sanayi camları (pencere camı) ve obsidiyenler (volkanik camlar) kimyasal bağlayıcı (polyester) ile bir araya getirilerek iç mekân için kaplama malzemesi (aglomera taşı) üretilmiştir. Üretilen bu aglomera taşlarının malzeme özellikleri belirlenerek kaplama olarak kullanılan doğal yapı taşları ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

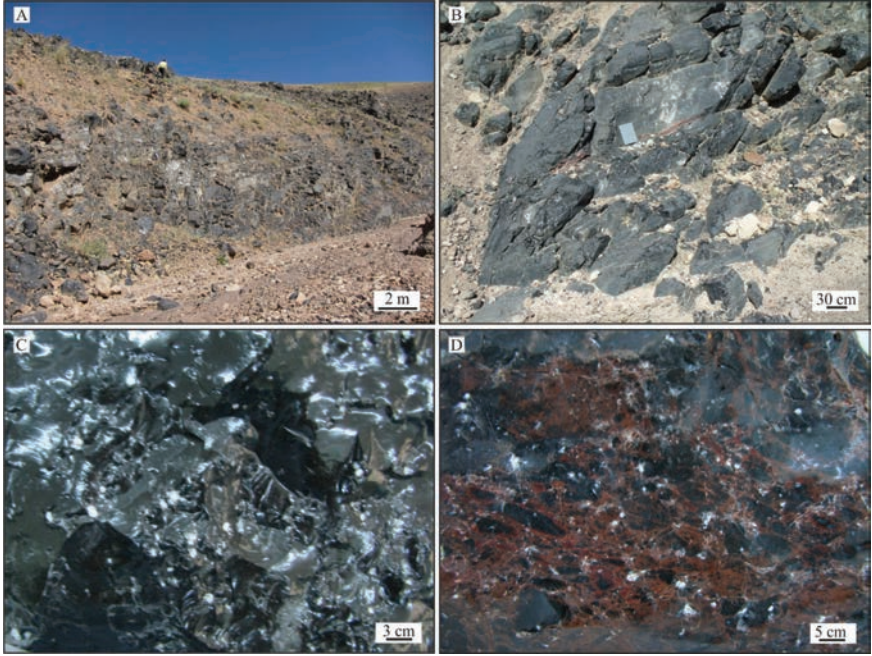
2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan obsidiyenler, Van Gölü kuzeyinde, Bitlis ile Adilcevaz ilçesi civarında yüzeyleyen Süphan Volkanitlerinden alınmıştır. Bölgede obsidiyenler, Harmantepe-Çanakyayla köyleri arasında dar bir alanda görülür (Şekil 1). Bölgede açılmış yol yarmalarında, ortalama birkaç dm mertebesinde boyutlarda olmak üzere yaklaşık 7-8 m kalınlığında bir istif de farklı boyutlarda yüzlek verirler. Çoğunlukla siyah renkli bazen kahverengi veya her iki renkte alacalı veya mozaik olarak gözlemlenmektedir (Şekil 2). Ogata, Nakamura, Nagao ve Akimoto 1989, yaptıkları çalışmada bölgedeki obsidiyenlerin yaşını $0,76 \pm 0,56$ milyon yıl olarak belirtmişlerdir. Domsu yapılarda gözlemlenen obsidiyenlerin alt kesimleri, perlitik obsidiyen kül ve riyolit bloklarından oluşan debris-avalanche ürünlerinden meydana gelmiştir. Obsidiyenler, camı akma dokusu ve perlitik bir dokuya sahiptir. Ayrıca plajiyoklas, ortopiroksen, alkali feldispat, amfibol, biyotit, kuvars fenokristalleri ile karakterize edilen mineral parajenezine sahiptirler (Özdemir, ve Güleç 2014).

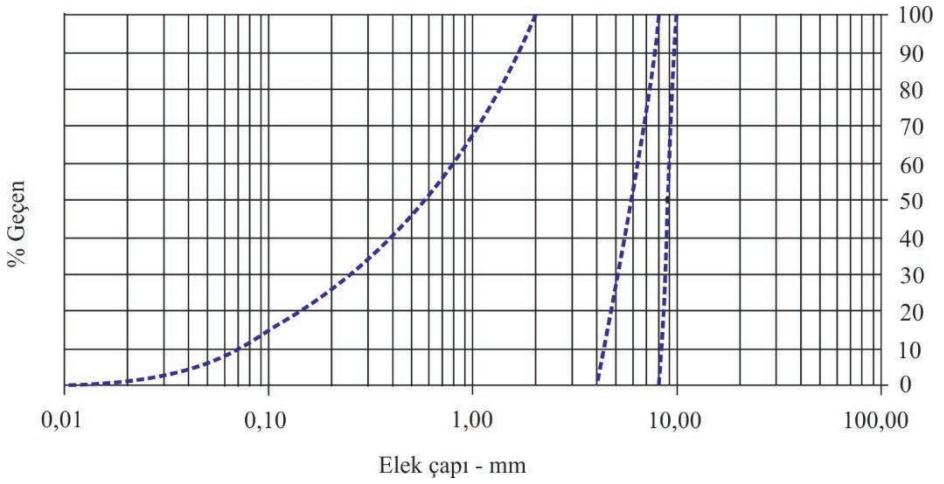


Şekil 1. Çalışmada kullanılan obsidiyenlerin yer aldığı bölgenin jeolojisi

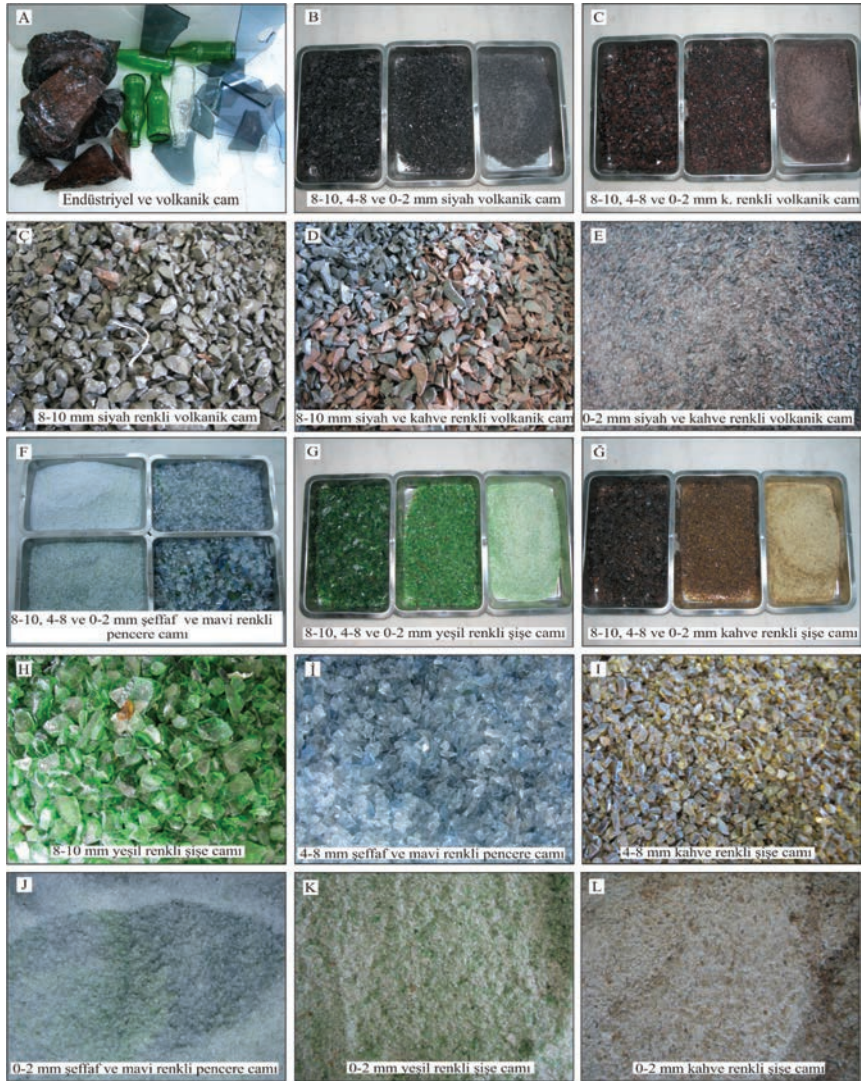
Pencere camları yerel bir cam işletmesinden, endüstriyel şişe camlar ise yerel kafeterya ve lokanta gibi işletmelerden temin edilmiştir. Temin edilen endüstriyel camlar ve obsidiyenler, önce bir çekiç yardımıyla 5-10 cm boyutlara ufaltılmıştır. Daha sonra laboratuvar tipi çeneli kırıcı ile kullanılarak 1 cm ve daha küçük parçalara indirgenmiştir. Kırılan malzemeler elek yardımıyla 0-2 mm, 4-8 mm, 8-10 mm aralığına boyutlandırılmıştır (Şekil 3 ve Şekil 4).



Şekil 2. A ve B: Çalışmada kullanılan obsidiyenler ve mostraları. C: Siyah obsidiyen, D: Kahverenkli, siyah obsidiyen



Şekil 3. Çalışmada kullanılan endüstriyel cam ve obsidiyenlerin tane çapı dağılımları



Şekil 4. Çalışmada kullanılan endüstriyel camlar; obsidienler ve hazırlanan agregalar

2.2. Yöntem

Çalışma üç aşamada yürütülmüştür. Birinci aşamada endüstriyel camların ve obsidienlerin mineralojik, petrografik ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada bu endüstriyel camlar ve obsidienlerden üretilen agregaların, agrega özellikleri, üçüncü aşamada ise agregalardan üretilen kaplama malzemelerin, mineralojik, petrografik ve malzeme özellikleri incelenmiştir.

Endüstriyel camların ve obsidiyenlerin mineralojik ve petrografik özellikleri için camları temsil edecek şekilde örnekleme yapılmış ve her camdan beş adet ince kesit hazırlanmıştır. Hazırlanan ince kesitlere TS EN 12407 (2019)'a göre Olympus BX41 marka polarizan mikroskopta çift nikol 10X büyütmede petrografik analiz yapılarak mineral yüzdele-ri belirlenmiştir. Endüstriyel ve volkanik camların kimyasal özellikleri ise Acme Laboratuvarında (Kanada) Endüktif Eşleşmiş Plazma Emisyon Spektrometresi (ICP-ES) metodu kullanılarak ana oksitleri (%) belirlenmiştir.

Daha sora bu camlar hacimce % 50 agrega % 50 bağlayıcı ve sertleş-tirici (<%1) olacak şekilde Tablo 1'de verilen oranlarda karıştırılarak bir-leştirilmiştir. Bu çalışma için hazırlanan 5x30x30 cm ölçülere sahip met-al kalıplara dökülmeden önce kalıpların iç yüzeyi Polivaks sv-6-mekp adlı kalıp yağı ürünü yağlanmış ve hazırlanan karışım kalıplara yerleş-tirilmiştir. Yerleştirme işleminde ince taneli agrega karışımları çoğunlukla kendisi kalıba yerleşmiş ya da çok az bir titreşim ile yerleştirilmesi sağ-lanmıştır. Fakat iri taneli agrega karışımları kendiliğinden kalıba yerleş-memiş, ek olarak titreşim ve şişleme yardımı ile kalıba yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleştirilen malzeme bir gün sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan malzemelerin bir yüzeyi sulu parlatma/cilalama ma-kinası aşındırılarak, parlatılmış ve fotoğrafı çekilmiştir. Fiziksel ve mek-anik özelliklerin belirlenmesi amacıyla ilgili Türk Standartları Enstitü-sünün (TSE) kaplama için kullanılan "Aglomera Taşlar" standartında belirtilen ölçülerde taş kesme testeresi ile kesilerek boyutlandırılmıştır. Ve "Aglomera Taşlar" standartlarında belirtilen bazı malzeme özellikle-ri belirlenmiştir. Ek olarak üretilen kaplama malzemelerine petrografik analiz yapılarak, tanelerin bağlayıcı ile olan kalitesi belirlenmiştir.

Tablo 1. Kaplama malzemesi üretimi için kullanılan karışım oranları

Reçete No	Karışım Oranları
R1	% 50, 0-2 mm EC + % 50 PS
R2	% 25, 4-8 mm + % 25, 8-10 mm EC + % 50 PS
23	% 30, 0-2 mm EC + % 10, 4-8 mm + % 10, 8-10 mm EC + %
R4	% 50, 0-2 mm O + % 50 PS
R5	% 25, 4-8 mm + % 25, 8-10 mm O + % 50 PS
R6	% 30, 0-2 mm O + % 10, 4-8 mm + % 10, 8-10 mm O + % 20
R7	% 20, 0-2 mm EC + % 30, 0-2 mm O + % 50 PS
R8	% 30, 0-2 mm EC + % 20, 0-2 mm O + % 50 PS
R9	% 35, 0-4 mm EC + % 15, 0-2 mm O + % 50 PS
R10	% 25, 0-4 mm EC, % 25, 0-4 mm O + % 50 PS

EC: Endüstriyel cam agregası, O: Obsidiyen agregası, PS: Polyester ve sertleştirici

3. Deneysel Sonuçlar

3.1. Endüstriyel cam ve obsidiyenlerin mineralojik ve petrografik özellikleri

Çalışmada kullanılan, siyah ve kahve renkli obsidiyenlerden hazırlanan ince kesitlerin, polarizan mikroskop altında detaylı incelemelerinde, volkanik faz magmatik kayaç, temel olarak iki bileşenden oluşmaktadır. Birincisi matrix bölümü, ikincisi ise fenokristallerdir (Tablo 2). Kayacın büyük çoğunluğunu oluşturan matrix kısmı; volkanik cam olarak, ağırlıklı feldispat mikrolitleri şeklinde mikrokristalin ve kriptokristalin ara maddeden meydana gelmektedir. İnce kesitlerde fenokristal olarak felsik karakterde feldispat mineralleri (ortoklas-plajjoklas) ve kuvars bulunmakta, femik nitelikli amfibol (hornblend), yaygın olarak biotitler ve opak mineraller gözlenmektedir (Şekil 5).

Mikrokristalin ve kriptokristalin ara maddeden oluşan camı matrixte akma yapısı gözlenmektedir. Matrix içerisinde yer alan fenokristallerde akma yapısına bağlı olarak yönelme mevcuttur. Fenokristaller yaygın olarak anedral ve subhedral kristal şekli göstermektedir. Feldispat (K-feldspat) minerallerinde kısmı gelişmiş elek yapısı, bazı kesitlerde kuvars minerallerinde ise körfez yapısı mevcuttur. Diğer taraftan, biotit minerallerinin yaygın olduğu bölümlerde amfibol minerallerinin özellikle çeper kısımları ve daha az iç kısımları FeO reaksiyonu ile opak hale gelmiştir. Bazı alanlarda ise amfibol minerali iskeletleri gözlenmektedir (Şekil 5).

Magmatik yüzey kökenli olan obsidyen (riyolitik cam) kayacı, genel olarak hipokristalin porfiriktir. Volkanik cam bakımından zengin matrix ve içinde yer alan fenokristallerden dolayı vitrofirik dokuya sahiptir.

Endüstriyel cam, her ne kadar obsidiyene yakın kimyasal benzerlik gösterse de, obsidiyene göre çok daha hızlı soğuduğu için, dokusal olarak tamamen obsidiyenden farklıdır. Endüstriyel camın dokusu tamamen matrixden meydana gelmiştir. Matrix içerisinde obsidiyenlerde olduğu gibi herhangi bir fenokristal veya mikrolit görülmemiştir.

Kayacın kimyasal analizinde majör oksit olarak SiO₂ oranı % 74 olup, asidik magmatik yüzey kayacı sınıfında yer alır. %4.6 K₂O, % 4.09 Na₂O ve % 1 CaO içeren kayaçta, volkanik cam (matrix) kısmında yer alan mikrolitlerin ve feldispat fenokristallerinin çoğunlukla alkali feldispat olduğunu göstermektedir (Tablo 3).

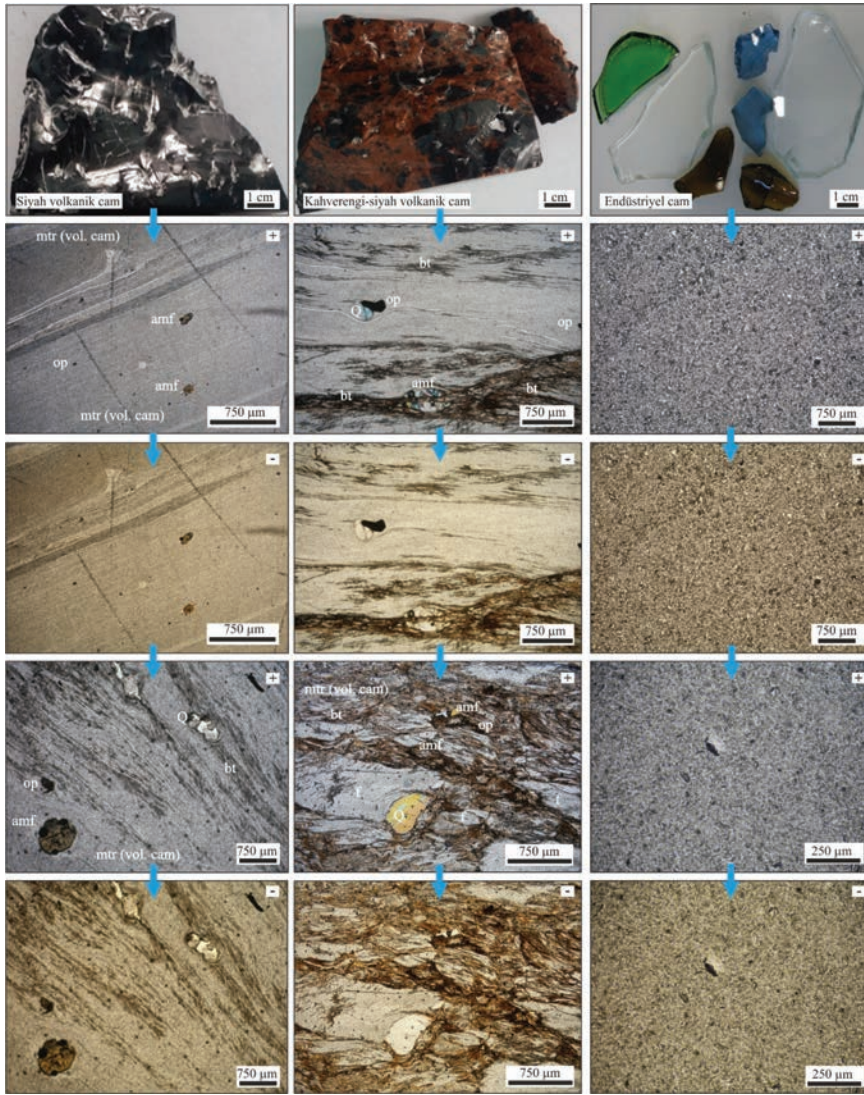
Tablo 2. Endüstriyel cam ve obsidiyenlerin modal analizi

Örnek adı	Matriks/Vulkanik cam	Fenokristaller
		Mikrokristalin/kriptokristalin, feldispat, kuvars, amfibol ve biotit mikrolitleri
Siyah obsidiyen	96	4
Kahve renkli obsidiyen	96	4
Endüstriyel cam	Cam matriks	

3.2. Endüstriyel cam ve obsidiyenlerin kimyasal özellikleri

Endüstriyel cam ve obsidiyen örneklerinin ana oksitleri yüzdelerine bakıldığında obsidiyenlerin silikat camı karakterinde olduğu, yüksek SiO_2 (% 74) ve Al_2O_3 (% 13) oranına sahip oldukları, bununla beraber düşük kireç MgO (% 0,1) ve CaO (% 1) ve düşük alkali Na_2O (% 4) ve K_2O (% 4.7) değerlere sahip olduğu görülür (Tablo 3).

Endüstriyel camların ise tipik soda-kireç camı karakterinde olduğu, obsidiyenlere nazaran daha düşük SiO_2 (% 70) ve Al_2O_3 (% 1) oranına sahip oldukları, bununla beraber yüksek kireç MgO (% 4) ve CaO (% 9-10) ve yüksek alkali Na_2O (% 14) değerlere sahip olduğu görülür (Tablo 3).



Şekil 5. Çalışmada kullanılan endüstriyel camlar, obsidiyenlerin ince kesit görüntüleri

Tablo 3. Endüstriyel cam ve obsidiyenlerin ana oksitleri

No	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	KK	Toplam /
	%												
EC1	70,42	0,94	0,52	4,14	8,72	14,04	0,15	0,06	0,03	<0,01	0,005	0,8	99,91
EC2	70,11	1,57	0,53	3,19	9,64	13,63	0,49	0,06	0,02	<0,01	0,033	0,6	99,94
SO	74,04	13,23	1,82	0,11	1,12	4,09	4,60	0,09	0,03	0,04	0,004	0,7	99,99
KO	73,84	13,03	1,92	0,11	1,2	3,79	4,78	0,09	0,03	0,04	0,004	0,7	99,99

3.3. Endüstriyel cam ve obsidiyenlerin malzeme özellikleri

Obsidiyenlerin yoğunlukları 2350kg/m^3 iken endüstriyel camların yoğunlukları daha yüksektir (2500kg/m^3). Her iki camında su emme değeri % 0,1'in altındadır. Literatürde obsidiyenlerin ve camın sertliği için her ne kadar 5,5 mohs sertliği tanımlanmış olsa da, yapılan mohs sertlik testinde obsidiyenlerde endüstriyel camlara göre % 20'i daha yüksek sertlik (mohs) değeri elde edilmiştir. Her iki malzemede aşınmaya karşı (mikro deval aşınma direnci %7,5-8) son derece dirençli, bununla beraber darbe ile parçalanmaya karşı (parçalanma direnci % 38,5-39) oldukça dirençsizdir ve kırıldıklarında konkoidal şekilli yüzeyler verme eğilimindedirler (Tablo 4).

Tablo 4. Endüstriyel cam ve obsidiyenlerin malzeme özellikleri

Özellik	Boyut (mm)	Standard	Obsidiyen	Endüstriyel Cam
Tane yoğunluğu: kg/m^3	10-14	TS EN 1097-6 [18]	2355 ± 2	2495 ± 33
Su emme (%)	10-14	TS EN 1097-6 [18]	$< 0,01$	$< 0,01$
Aşınma direnci: %	10-14	TS EN 1097-1 [19]	$7,735 \pm 0,191$	$7,878 \pm 0,342$
Parçalanma direnci: %	10-14	TS EN 1097-2 [20]	$38,580 \pm 0,311$	$38,980 \pm 0,085$
Sertlik (mohs)	50x50	TS 6809 [21]	6,5-7	5,5
Kırılma Şekli			Konkoidal	Konkoidal

3.4. Üretilen kaplama malzemesinin özellikleri

Üretilen kaplama malzemelerin fiziksel özelliklerinden görünür yoğunlukları ve su emme değerleri TS EN 14617-1 (2014)'e göre belirlenmiştir. Mekanik özelliklerinden yoğun yük altında eğilme dayanımları TS EN 14617-2 (2008)'e göre, basma dayanımı TS EN 14617-15 (2006)'a göre, aşınma miktarları TS EN 14617-4 (2012)'e göre ve darbe dayanımları TSE 699 (2009)'a göre belirlenmiştir. Testler 6 numune üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tablo 4'de tüm fiziksel ve mekanik özelliklere ait sonuçların aritmetik ortalaması verilmiştir.

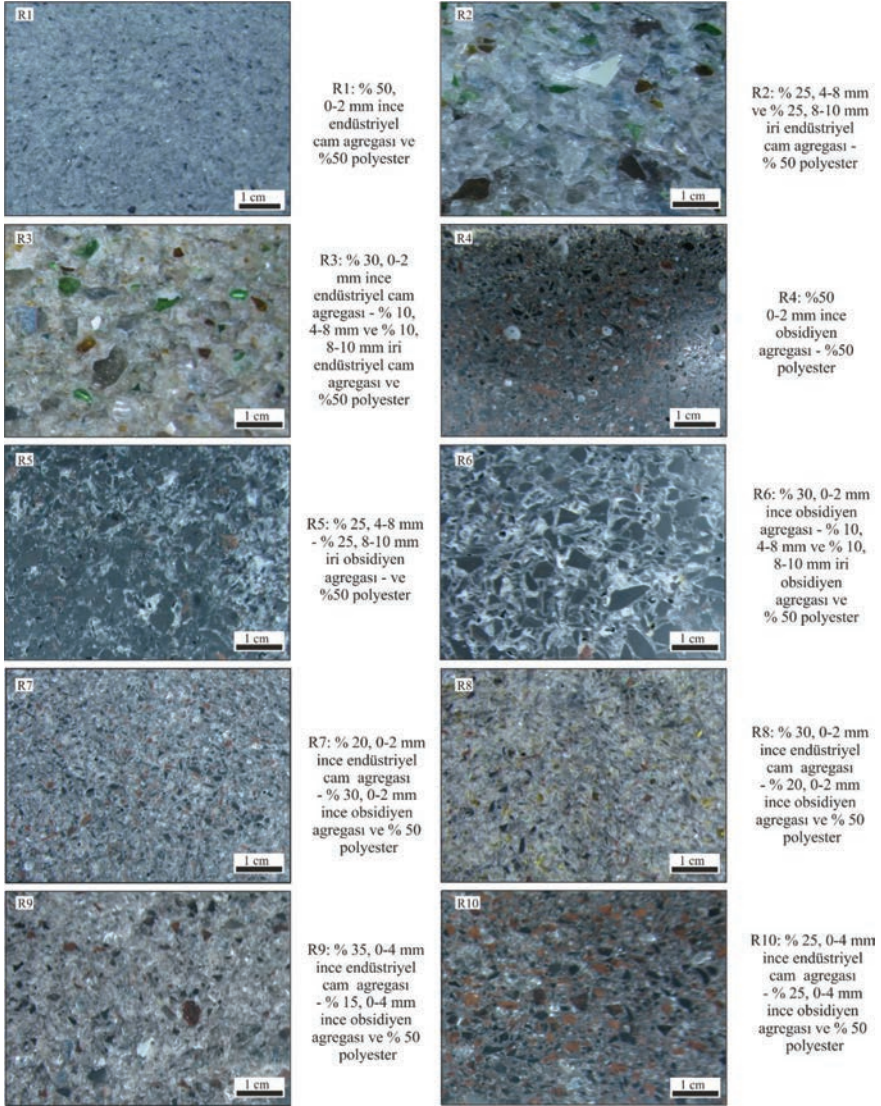
Tablo 5. Kaplama Malzemesinin fiziko-mekanik özellikleri

Reçete No	Görünür Yoğunluk kg/m^3	Su Emme %	Basma Dayanımı MPa	Eğilme Dayanımı MPa	Aşınma Dayanım mm	Darbe Dayanımı MPa
R1	1714 ± 24	$0,23 \pm 0,04$	$57,61 \pm 9,02$	$20,89 \pm 0,50$	$19,11 \pm 1,16$	$28,33 \pm 4,08$
R2	1884 ± 32	$0,72 \pm 0,04$	$38,53 \pm 3,06$	$22,12 \pm 0,22$	$17,58 \pm 0,49$	$2,00 \pm 0,00$
R3	2044 ± 10	$0,39 \pm 0,04$	$33,41 \pm 1,14$	$4,13 \pm 0,33$	$17,30 \pm 0,33$	$2,00 \pm 0,00$
R4	1615 ± 8	$0,29 \pm 0,09$	$44,74 \pm 3,41$	$12,21 \pm 0,59$	$18,85 \pm 0,12$	$11,0 \pm 2,45$

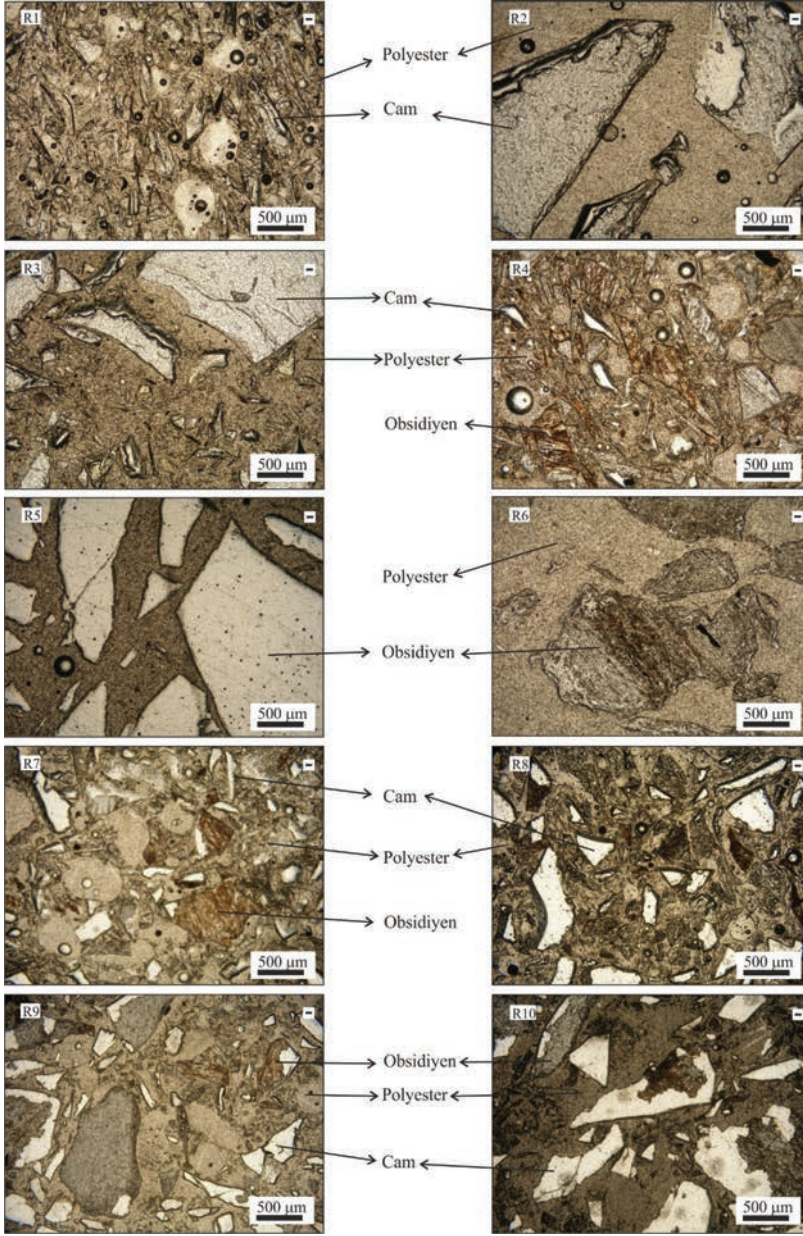
R5	1786 ± 14	0,64 ± 0,10	31,85 ± 3,01	1,77 ± 0,22	20,05 ± 2,38	2,00 ± 0,00
R6	1876 ± 23	0,16 ± 0,01	52,10 ± 1,22	7,79 ± 0,32	19,10 ± 0,06	13,33 ± 3,27
R7	1750 ± 5	0,26 ± 0,02	51,29 ± 1,17	15,71 ± 0,48	19,12 ± 0,35	26,67 ± 5,16
R8	1814 ± 6	0,22 ± 0,03	71,32 ± 2,88	16,34 ± 0,67	18,00 ± 0,14	38,00 ± 6,20
R9	1946 ± 6	0,11 ± 0,04	58,03 ± 3,43	14,65 ± 0,13	17,45 ± 0,26	17,33 ± 4,13
R10	1908 ± 6	0,15 ± 0,05	63,09 ± 0,56	15,89 ± 0,15	18,03 ± 0,33	18,67 ± 3,27
Standart	TS EN 14617-1	TS EN 14617-1	TS EN 14617-15	TS EN 14617-2	TS EN 14617-4	TS 699
n	6	6	6	6	6	6

n: deney tekrar sayısı

İnce endüstriyel cam ve obsidiyenler kullanılarak elde edilen kaplama malzemelerin deseni, genel olarak granit, granodiyorit ve diyabaz gibi kristalli kayaların desenine benzerlik sunmaktadır (Şekil 6). Kaplama malzemenin matriksini, bağlayıcı (polyester) oluşturduğundan iç dokusu ile kristalli kayalardan oldukça farklılık gösterir. Doku yönü ile daha çok kırıntılı tortul kayaların dokusuna benzer bir doku özelliği sergilemektedir (Şekil 7). Hem ince hem de iri endüstriyel cam ve obsidiyenlerden elde edilen kaplama malzemelerin fiziksel özellikleri kristalli kayalara nazaran belirgin farklılık göstermektedir. Bükülme dayanımı ve aşınmaya karşı dirençleri gibi mekanik özellikleri açısından, ince endüstriyel cam ve obsidiyenlerden elde edilen kaplama malzemeler, kristalli kayalara oldukça yakın benzerlik göstermektedir.

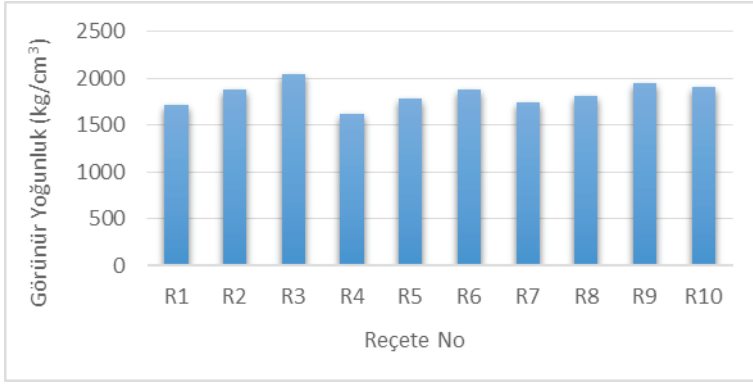


Şekil 6. Farklı karışımlarla üretilen kaplama malzemelerinin işlenmiş yüzey görüntüleri



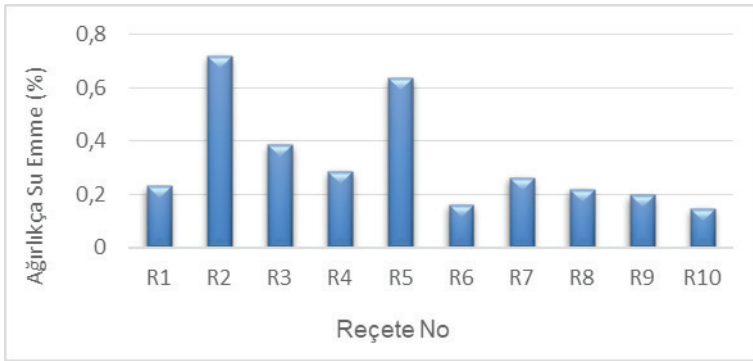
Şekil 7. Üretilen kaplama malzemelerin ince kesit görüntüleri (-: tek mikroskop)

Kaplama malzemelerin görünür yoğunluk değerleri 1615-2044 kg/m³ arasında değişmektedir. Karşının yaklaşık yarısının polyester olması ve polyesterin yoğunluğunun kullanılan camlara göre düşük olması elde edilen yeni malzemenin de yoğunluğunun düşük olmasına neden olmuştur. Bu yoğunluk değerleri, kaplama olarak kullanılan bir doğal taşın nazaran oldukça düşük yoğunluklardır.



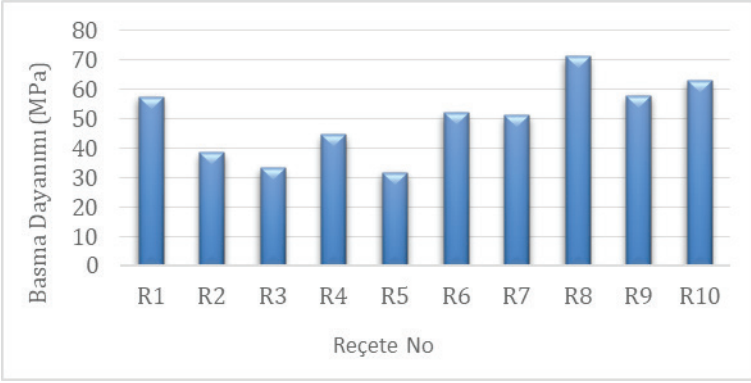
Şekil 8. Üretilen kaplama malzemelerin görünür yoğunluk değerleri

Kaplama malzemelerin ağırlıkça su emme değerleri % 0,147 ile % 0,722 arasında değişmektedir. Yine sadece iri agrega kullanılarak elde edilen örneklerin (R2 ve R5) su emme değerleri belirgin bir şekilde artmıştır. Diğer örneklere ait su emme değerleri kaplama olarak kullanılan doğal taşlara yakın seviyede hatta daha iyi düzeyde olduğu söylenebilir (Şekil 9).



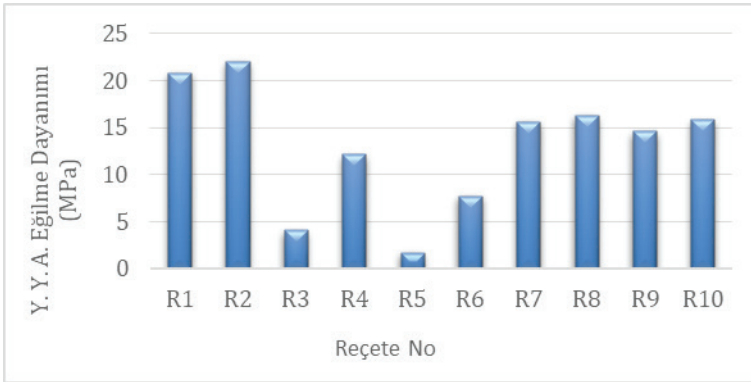
Şekil 9. Üretilen kaplama malzemelerin ağırlıkça su emme değerleri

Kaplama malzemelerin basma dayanımı değerleri 31,85 MPa ile 71,22 MPa arasında değişmektedir. Tüm örneklerin basınç dayanımı değerleri kaplama olarak kullanılan doğal taşların ortalama basınç dayanımı değerinden (30 MPa) büyüktür (Şekil 11).



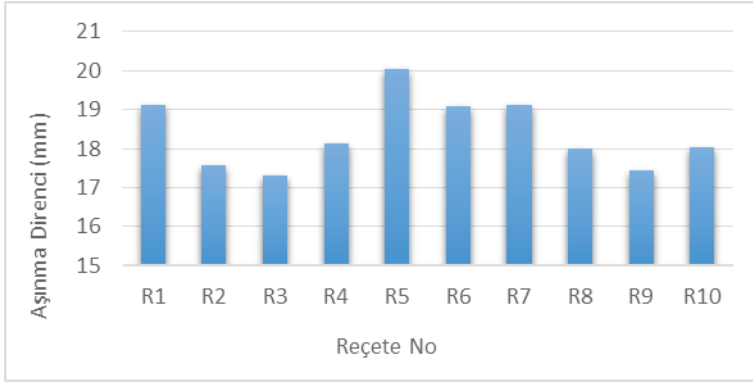
Şekil 10. Üretilen kaplama malzemelerin basınç dayanımı değerleri

Kaplama malzemelerin yoğun yük altında eğilme dayanımı değerleri 1,77 MPa ile 22,12 MPa arasında değişmektedir. R3 ve R5 numaralı örneklerin yoğun yük altında eğilme dayanımı değerleri diğer örneklerle göre oldukça düşük çıkmıştır Bunun nedeni bu kaplama malzemelerin üretiminde sadece iri endüstriyel cam ve obsidiyen agregasının kullanılmış olmasıdır (Şekil 10). R3 ve R5 numaralı örnekler haricinde diğer tüm örneklerin yoğun yük altında eğilme dayanımı değerleri kaplama olarak kullanılan bir doğal taşın yoğun yük altında eğilme dayanımı değerlerine yakındır.



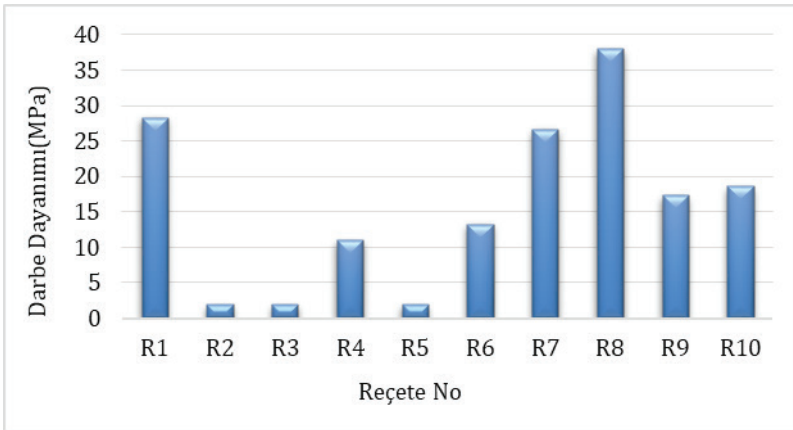
Şekil 11. Üretilen kaplama malzemelerin yoğun yük altında eğilme dayanımı değerleri

Kaplama malzemelerin aşınma dirençleri (disk aşınma yöntemi ile) 17:30 mm ile 20.05 mm arasında değişmektedir. Tüm örneklerin sahip olduğu aşınma dirençleri kaplama olarak kullanılan bir doğal taşın ortalama aşınma direncine oldukça yakındır (Şekil 12).



Şekil 12. Üretilen kaplama malzemelerin böhme yüzeysele aşınma kaybı değeri

Kaplama malzemelerin darbe dayanımı değeri 2 MPa ile 38 MPa arasında değışmektedir. Gerek iri cam gerekse de iri obsidiyen agregalarının daha yoğun olarak kullanıldığı örnekler (R2, R3 ve R5) diğer örneklere kıyasla oldukça düşük darbe dayanımı sergilemişlerdir (Şekil 13).



Şekil 14. Üretilen kaplama malzemelerin darbe dayanımı değeri

İnce agrega kullanılarak üretilen kaplama malzemeleri, renk, desen fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından kaplama olarak kullanılan bir doğal taşın sahip olduğu özelliklere oldukça yakın sonuçlar vermiştir

Petrografik inceleme sonuçları, ince endüstriyel cam ve obsidiyen agregalarının (<4 mm) polyester bağlayıcı ile daha iyi bir bağ yaptığı ve daha kompakt bir malzeme oluşturduğunu gözlenmiştir. İri cam agregaları kullanıldığında ise iri taneler arasındaki boşluğun tamamen polyester ile dolmadığı, polyester bağlayıcı le birlikte bir miktar gözenek olduğu gözlenmiştir. Bu durum, elde edilen kaplama malzemenin fiziksel ve özellikle mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği görülmüştür.

Sonuç olarak bu çalışma ile malzeme özellikleri bakımından birbirine oldukça yakın olan atık durumundaki endüstriyel camların ve obsidiyenlerin ince agrega haline getirildikten sonra, polyester bağlayıcı kullanılarak kaplama malzemesi (aglomera taşı) üretilebileceği, atık durumundaki camlar ile günümüzde hala verimli bir şekilde ham madde olarak kullanılmayan obsidiyenlerin değerlendirilebileceği ortaya konulmuştur. Böylelikle hem atık durumundaki cam malzemeleri geri kazanılmış hem de kaplama olarak kullanılan doğal taş özelliklerine yakın, iç mekân kaplama malzemesi elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2017-6134 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Sağladığı maddi destek için Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine, çalışmada kullanılan atık sanayi camlarının temininde gösterdikleri ilgiden dolayı Torbalı (İzmir) Cam San. ve Tic. Ltd. Şti firmasına bildirimini değerlendirme aşamasında önerileri ile katkılar sağlayan hakemlere ve bu organizasyonda emeği geçen tüm ekibe teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Neuendorf, K. K. E, Mehl, J. P. J., Jackson A. (2011). Glossary of Geology. Amerika. American Geoscience Institute. 5th Edition. 2011.
- Ercan, T., Yeğingil, Z., Bigazzi, G., Oddone, M. ve Özdoğan, M. (1990). Kuzeybatı Anadolu Obsidiyen buluntularının kaynak belirleme çalışmaları: Jeoloji Mühendisliği, 36, 19-32.
- Doğanay, H. ve Altaş, N. T. (2013). Doğal kaynaklar Pegem Yayınevi. Ankara.
- Akbulut, U. (2016). Obsidiyen: Anadolunun en eski ihraç ürünü, <https://www.uralakbulut.com.tr/wp-content/uploads/2016/03/OBS%20DYEN-ANADOLU-NUN-EN-ESK%20-%20HRA%2087-%209cR%209cN%209c-1-MART-2016.pdf>
- Güngördü, F. V. (2014). Obsidian and Its Significance for Cappadocian Pre-Pottery Neolithic. Nevşehir Hacı Bektaş Veli University Journal of Social Sciences Volume 3, 103-110.
- Demir, M., (2017). Sarıkamış obsidiyen kaynakları ve değerlendirilmesi. Kafkas Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 19, 119-139.
- Akbulut, U. (2010). Cam nedir? Nasıl ve ne zaman keşfedildi. <https://www.uralakbulut.com.tr/wp-content/uploads/2009/11/cam-nedir.pdf>
- Hvaláč, J. (1983). The technology of glass and ceramics: Glass and Science Technology 4, Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- Eppler, R.A., and Eppler, D. R. (2000). Glazes and Glass Coatings: The American Ceramic Society.
- Callister, W. D. (2007). Material Science and Engineering: An Introduction” 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- Pagçev, Türkiye’de 2019 **geri kazanılan ambalaj istatistikleri**, <http://www.pagcev.org/atik-istatistikleri>
- Çelik, M. Y. ve Emrullahoğlu, Ö. F. (1999) Mermer Atıklarından Polyester Bağlayıcı Suni Mermer Blok ve Levha Üretiminin Araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 1, 35-50.
- Ming, L. Y., Chun, H. K., Fang, C. C., Shang, L. L., Jyh, D. L., Ming, Y. S. and Jeng, C. L. (2008). Artificial stone slab production using waste glass, Stone fragments and vacuum vibratory compaction. Cement and Concrete Composites. 30, 583 -587.
- Sevinç, H. and Durgun M. Y. (2021). A novel epoxy-based composite with eggshell, PVC sawdust, wood sawdust and vermiculite: An investigation on radiation absorption and various engineering properties. Construction and Building Materials. 300, 123985

- Ogata A., Nakamura K., Nagao K. and Akimoto S. (1989). K-Ar age of young volcanic rocks of Turkey. 1989 Annual Meeting of the Geochemical Society of Japan, ICO 3.
- Özdemir, Y., ve Güleç, N., (2014). Geological and geochemical evolution of the Quaternary Süphan stratovolcano, Eastern Anatolia, Turkey: evidence for the lithosphere–asthenosphere interaction in post-collision volcanism: J. Petrol. 55, 37-52.
- TS EN 12407 (2019). Doğal taşlar - Deney yöntemleri - Petrografik inceleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6 (2013). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-1 (2011). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (Mikro-Deval)”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-2 (2010). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 6809, (1989). Mohs sertlik cetveline göre sertlik tayini. **Türk Standartları Enstitüsü, Ankara**
- TS EN 14617-1, (2014). Aglomera taşlar - Deney yöntemleri - Bölüm 1: Görünür yoğunluk ve su emme tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14617-2 (2008). Aglomera taşlar - Deney yöntemleri - Bölüm 2: Eğilme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14617-4 (2012). Aglomera taşlar - Deney metotları - Bölüm 4: Aşınma direncinin tayini Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14617-15 (2006). Aglomeralar - Deney metotları - Bölüm 15: Basma dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE 699 (2009). Doğal yapı taşları-İnceleme ve laboratuvar metotları. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

Bölüm 13

ÜCRETSİZ MATEMATİKSEL MODEL ÇÖZÜCÜ
SEÇİMİ: ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ
TEMELLİ BİR UYGULAMA

Hamid YILMAZ¹

¹ Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Bayburt/
Türkiye, hamidyilmaz@bayburt.edu.tr / Orcid ID: 0000-0003-0852-4119

1 GİRİŞ

Gerçek dünya ile matematiği bir araya getiren matematiksel modelleme, eğitimde yoğun şekilde kullanılan konulardan biridir (Blum ve Borromeo Ferri, 2009). Matematiksel modelleme, en basit anlamı ile matematik veya matematik dışındaki bir olayı ve bu olaylar arasındaki ilişkileri matematiksel semboller ile ifade etmeye çalışır, bu olaylar arasında ve içerisindeki matematiksel bağlantıları ortaya çıkarma sürecidir. Son yıllarda matematiksel modellemenin ilköğretim, ortaöğretim ve yükseköğretimde matematik dersi içeriğinin büyük bir kısmını kaplaması gerektiği düşünülmektedir (Verschaffel vd., 2002, Deniz ve Akgün, 2017). Matematiksel modelleme günümüzde uygulama alanı olması ile beraber, mühendislik, ekonomi, tıp gibi birçok alanda karşımıza çıkmaktadır (Boysen vd., 2008, Anthony and Biggs, 1996, Fackrell, 2009). Matematiksel modelleri çözmeye yarayan ücretsiz ve ticari birçok yazılım mevcuttur. Bu alternatiflerden hangisinin daha uygun olduğuna karar vermek için bilimsel yöntemlerden yararlanılmalıdır.

Karar verme süreci, teknolojinin de etkisi ile günümüz sosyal, eğitim ve iş çevresinde karmaşık bir yapı haline bürünmüştür. Bilgi ve teknolojinin bu hızlı gelişimi, yeni problemleri de beraberinde getirmiştir (Ersöz ve Kabak, 2010). Genel anlamı ile karar verme, ortaya çıkan alternatifleri içerisinde en faydalı seçimi gerçekleştirmek olarak tanımlanmaktadır. Mevcut alternatiflerin en az iki adet olmaması durumunda ise karar vermeden bahsedilememektedir (Kuru ve Akın, 2012, Saat, 2000). Bu süreç içerisinde, problemde birbirleri ile çelişebilen kriterler doğrultusunda, alternatifler arasından en iyi(leri) seçmek amacı ile Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinin uygulanması gereksinim olarak karşımıza çıkmaktadır (Genç, 2013). ÇKKV yöntemleri çeşitli kriterler altında mevcut seçenekler içerisinde en iyi (optimum) olanın tayin edilmesidir (Arslan vd., 2018, Cho, 2003). ÇKKV ile ilgili olarak bir çok yöntem literatürde bulunmaktadır. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Karar verme sürecinde, en uygun yöntemin belirlenmesi karar verici tarafından probleme ait özellikler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır (Ersöz ve Kabak, 2010).

Bu çalışma kapsamında, lisans seviyesinde verilen matematiksel modelleme dersleri için, ücretsiz olarak sunulan çözümler ele alınmıştır. Ele alınan bu konu, çeşitli alternatif çözümler üzerinden birçok kriter esas alınarak ÇKKV yöntemi ile probleme çözüm yaklaşımında bulunulmuştur.

Çalışmanın diğer bölümleri şu şekildedir; ikinci bölümde ÇKKV yöntemleri ve matematiksel modelleme ile ilgili literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, alternatif yazılımlar (5 ücretsiz matematiksel model çözümleri) ve kriterlerden bahsedilmiş ve Analitik Hiyerarşi Prosesi

(AHP) ile bulunan karar alternatif ağırlıkları ve kriter ağırlıkları kullanılarak probleme MABAC Yöntemi uygulanmıştır. Son olarak Sonuç bölümü sunulmuştur.

2 LİTERATÜR TARAMASI

Matematiksel model çözücüleri, bilgisayar bilimleri içerisinde yazılım sınıfında yer almaktadırlar. Bu sebeple, bu bölüm temel anlamda ÇKKV Yöntemleri kullanılarak çeşitli yazılım seçimleri ile ilgili literatür taramasına yer verilmiştir.

Çakır (2018), yaptıkları çalışmada, bir ilçe belediyesinde elektronik belge yönetim sistemi yazılım seçimi yapmışlardır. Çalışma kapsamında, ÇKKV yöntemlerinden SWARA yöntemi ile kriter ağırlıkları tespit edilmiş ve alternatif değerlendirmeleri EDAS yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak belirlenen 11 kriterin ağırlıklandırma işlemi SWARA yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu kriterler ışığında beş alternatif yazılım firması değerlendirmesi yapılmıştır.

Özbek ve Engür (2019), beş üniversite tarafından kullanılan öğrenci işleri otomasyonlarını ÇKKV yöntemlerinden Additive Ratio Assessment (ARAS), Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) ve Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS) yöntemlerini kullanarak değerlendirilmişlerdir. Öncelikli olarak ölçme kriterlerini ağırlıklandırma amacı ile SWARA yöntemini, öğrenci işleri otomasyonlarının performanslarının belirlenmesinde ise ARAS ve EDAS yöntemlerini kullanılmışlardır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında veri tabanı güvenliğinin öğrenci işleri otomasyonları için en önemli kriter olduğu belirlenmiştir.

Çetinyokuş ve Özdil (2016), çalışmalarında çeşitli iş zekası yazılımlarını ÇKKV yöntemi ile değerlendirmişlerdir. Çalışmada ilgili yazılımlar CRITIC ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Yaldır ve Özgür Polat (2016) yaptıkları çalışmada, üniversite ihtiyaçlarına yönelik en uygun elektronik belge yönetim sistemi yazılımı seçimi için kriterler belirlemişlerdir. Belirlenen bu kriterlerin ağırlıklandırılmaları AHP ve Bulanık AHP yöntemleri ile ele alınmıştır. Daha sonra alternatif elektronik belge yönetim sistemi yazılımları ÇKKV tekniklerinden AHP, Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemleri ile sıralama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Perçin ve Gök (2013), çalışmalarında sundukları metodolojide, ÇKKV yöntemlerinden AHP ve TOPSIS yaklaşımlarını kullanarak kurumsal kaynak planlama yazılımı seçimi ile ilgili karar verme sürecini ele almışlardır.

Yeşilyurt vd. (2019) yaptıkları çalışmada hastanelerde kullanılan

Hastane Bilgi Yönetim Sistemleri (HBYS) üzerine ÇKKV yöntemlerinde faydalanmışlardır. Bu kapsamda kullanılabilir yedi alternatif ile uzman kişiler tarafından altı kriter ele alınmıştır. AHP, TOPSIS ve PROMETHEE yöntemi kullanılarak en uygun yazılım seçilmiştir.

Hanine vd. (2016), çalışmalarında, iyi bilinen iki ÇKKV tekniği olan AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak yazılım sektöründe sık kullanılan ETL yazılım seçim problemi için çözüm aramışlardır.

Özen ve Koçak (2017) çalışmalarında kurumsal kayna planlama yazılımlarının seçimi üzerinde durmuşlardır. Bu amaçla alternatifler için dört ana kriter ve onsekiz adet alt kriter belirlemişlerdir. Alternatifler, belirlenen kriterler açısından, Bulanık AHP ve Dematel Yöntemleri kullanılarak yazılım seçimi ve değerlendirilmesini yapmışlardır.

Tunca vd. (2015) çalışmalarında muhasebe kayıtları için yazılan paket programların seçimi için AHP temelli TOPSIS ve ELECTRE yöntemi kullanmıştır. Çalışmada, altı alternatif muhasebe paket programı değerlendirilmiştir. Bu alternatifler, üç ana kritere bağlı olan onbeş alt kriter ile ele alınmıştır.

Ecer (2016) çalışmasında çeşitli kurumsal kaynak planlama yazılımlarını seçim kriterleriyle farklı alternatifleri değerlendirmiştir. Bu kapsamda, en iyi kurumsal kaynak planlaması sistemi seçimini ARAS yöntemi ile karar vermektir. Çalışmada fonksiyonellik, maliyet, kullanım kolaylığı, yazılım güvenilirliği, esneklik gibi kriterler ele alınmıştır.

Ayık ve Kılavuz (2013) çalışmalarında kullandıkları yazılımı değiştirmek isteyen üniversiteler için piyasada yer alan 14 yazılım belirlenmiş ve üniversitelerin ihtiyaçları doğrultusunda kriter ağırlıkları Analitik Ağ Süreci yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Ardından TOPSIS yöntemi kullanılarak sıralama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Sharma vd. (2018), çalışmalarında Hindistan tren istasyonlarının performansını değerlendirmek için karma bir ÇKKV metodolojisi önermektedirler. Mevcut yaklaşımları geliştirmek için AHP ve MABAC yöntemlerinin entegre edilmesiyle verimli bir değerlendirme tekniği önermişlerdir. Uzman görüşü doğrultusunda belirlenen kriter ağırlıkları AHP ile belirlenirken, alternatiflerin bu kriterlere göre değerlendirilmesi MABAC yöntemi ile yapılmıştır.

Mishra (2020), çalışmalarında ÇKKV problemlerini ele almak için MABAC yöntemine dayalı yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem, klasik MABAC yönteminde bazı değişikliklere ve kriter ağırlığının hesaplanması için yeni bir prosedüre dayanmaktadır. Sunulan yöntemin gerçek dünya ÇKKV problemlerinde uygulanabilirliğini göstermek amacı ile de bir programlama dili seçim problemi çalışmalarında ele alınmıştır.

Çınaroğlu (2020), çalışmasında yenilikçi girişimlere ait faaliyetlerin sektörel olarak değerlendirilmesini amaçlamış ve tümleşik bir ÇKKV yaklaşımı kullanmıştır. Öncelikle entropi yöntemi yardımı ile kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra değerlendirilme kısmında ise MABAC yöntemi tercih edilmiştir.

Bu çalışmaların yanı sıra MABAC yöntemi kullanılarak yapılan bazı çalışmalar Tablo 1’de verilmiştir.

Yazar(lar)	Çalışma Konusu	Kullanılan Yöntemler
Ayçin & Çakın (2019)	AB üyesi ülkelerin inovasyon performansının ölçülmesi	Entropi ve MABAC
Bakır (2019)	Havayolu İşletmelerinde eWOM’a dayalı memnuniyet düzeyinin analiz edilmesi	SWARA ve MABAC
Ulutaş (2019)	Bir mobilya atölyesi için en uygun pazarlama yöneticisi belirlenmesi	Entropi ve MABAC
Yu, Wang, & Wang (2017)	Trip Advisor web sitesi üzerinden otel seçimi	Bulanık mantık ve MABAC
Pamucar & Cirovic (2015)	Lojistik merkezleri için forklift satın alma süreci	DEMATEL ve MABAC
Veskovic, Stević, Stojić, Vasiljević, & Milinković (2008)	Bosna-Hersek’te demiryolu taşımacılığı yönetiminin değerlendirilmesi	Delphi, SWARA ve MABAC

Tablo 1: MABAC yöntemi ile yapılan bazı çalışmalar.

3 MABAC Yöntemi

İlk olarak 2015 yılında Pamucar ve Cirovic (2015) tarafından tanımlanan MABAC modeli, her alternatif arasındaki sınır yakınlık alanına uzaklıklarını hesaplama temelli çalışır ve çok sayıda avantaja sahiptir. Bunlar;

- 1-MABAC yöntemiyle hesaplama sonuçları sabittir,
- 2-Hesaplama denklemleri basittir,
- 3-Kazanç ve kayıpların gizli değerlerini hesaba katar,
- 4-Bu modeli diğer yaklaşımlarla birleştirmek mümkündür.

Bu nedenle, MABAC yöntemi makul karar verme sonuçları elde etmek için iyi bir araçtır. Bu sebeple çalışmada alternatiflerin sıralanması ÇKKV yöntemlerinden MABAC ile gerçekleştirilmiş olup, yönteminin aşamaları aşağıdaki gibidir.

Başlangıç karar matrisinin oluşturulması: MABAC yönteminde ilk olarak m alternatif ve n kriterden oluşan karar matrisi oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Karar matrisinin normalize edilmesi: Doğrusal normalizasyon işlemi ile karar matrisindeki normalizasyon matrisidir.

$$N = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1n} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{m1} & n_{m2} & \dots & n_{mn} \end{bmatrix}$$

Normalizasyon işlemleri, fayda kriteri ve maliyet kriterleri için hesaplanmaktadır.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^-}{x_i^- - x_i^+}$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^+}{x_i^- - x_i^+}$$

Ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşturulması: Burada kriterlere ait önem düzeyini belirten kriter ağırlıkları hesaplamalara dahil edilir.

$$v_{ij} = w_i \cdot (n_{ij} + 1)$$

Sınır Yakınlık Alanı (SYA) matrisinin kurulması: Bu aşamada her bir kriter için sınır yakınlık alanı değerleri belirlenir.

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^m v_{ij} \right)^{\frac{1}{m}}$$

Kriterlere ait g_i değerlerinin hesaplanmasından sonra sınır yakınlık alan $G = [g_i]_{1 \times n}$ kurulur.

$$G = [g_i]_{1 \times n}$$

Alternatiflerin, SYA uzaklıklarının hesaplanması: Bu aşamada Q matrisi, her bir matris elemanı için hücrenin SYA uzaklıkları hesaplanarak oluşturulur.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix}$$

Eşitlikde yer alan q_{ij} değerleri, ağırlıklandırılmış karar matrisi elemanları ile ve sınır yakınlık matrisi elemanları arasındaki fark alınarak elde edilir.

$$Q = V - G = \begin{bmatrix} v_{11} - g_1 & v_{11} - g_2 & \dots & v_{1n} - g_n \\ v_{21} - g_1 & v_{11} - g_2 & \dots & v_{2n} - g_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} - g_1 & v_{m2} - g_2 & \dots & v_{mn} - g_n \end{bmatrix}$$

Karar Alternatiflerinin Sınır Yakınlık Alanına Göre Durumlarının Belirlenmesi: Bir önceki aşamadaki q_{ij} değerlerine göre her karar alternatifi için (A_i), SYA'ya göre belirlenir.

$$A_i \in \left\{ \begin{array}{l} G^+ \text{ eğer } q_{ij} > 0 \\ G \text{ eğer } q_{ij} = 0 \\ G^- \text{ eğer } q_{ij} < 0 \end{array} \right\}$$

Bir karar alternatifi, SYA (G), Üst Yakınlık Alanı olan G^+ 'da ya da Alt Yakınlık Alanı olan G^- 'de yer alabilir. En iyi alternatifinin belirlenebilmesi için, kriterlere ilişkin değerlerinin çoğunun G^+ 'da bulunması gerekmektedir.

Karar Alternatiflerinin Sıralanması: Yöntemin son aşamasında karar alternatiflerin sınır yakınlık alanından uzaklık değerleri kullanılır her karar alternatifinin kriter fonksiyonları hesaplanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n q_{ij}$$

4 Çözücü Seçimi için MABAC Yöntemi Adımları

Araştırmanın ilk aşamasında, 5 adet ücretsiz matematiksel model çözücü programlar için 7 kriter belirlenmiş ve AHP yöntemi ile kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu uygulamada AHP ile hesaplanan kriter ağırlıkları kullanılarak ÇKKV yöntemlerinden MABAC yöntemi uygulanmıştır. Uygulama kapsamında belirlenen kriterler ve alternatifler Tablo2 ve Tablo 3'de yer almaktadır.

K1	KODLAMA KOLAYLIĞI
K2	UYGULAMAYA ERİŞİM KOLAYLIĞI
K3	AYRINTILI ÇÖZÜM ERİŞEBİLİRLİĞİ (RAPORLAMA)
K4	ÖĞRENME KOLAYLIĞI VE DÖKÜMANTASYON ULAŞILABİLİRLİĞİ
K5	YÖNEYLEM PROBLEMLERİNDE İHTİYAÇ KARŞILAMA
K6	ÇÖZÜMLEME SÜRESİ
K7	BİLGİSAYARDA KAPLADIĞI ALAN

Tablo 2: Çalışmada esas alınan kriterler

A1	EXCEL SOLVER
A2	GOOGLE OR TOOLS (PHYTON)
A3	WINQSB
A4	LPSOLVE
A5	QM FOR WINDOWS

Tablo 3: Alternatif matematiksel model çözücülere

Karar matrisinin normalize formu Tablo 4’de verilmiştir.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
LpSolveIDE	0,58	0,44	0,13	0,11	0,00	0,07	0,32
WinOSB	1,00	0,00	1,00	0,14	1,00	0,20	0,00
Qm For Windows	1,00	0,68	0,00	0,00	0,82	1,00	0,68
Google Or Tools(Phyton)	0,00	0,05	0,31	0,46	0,37	0,00	0,90
Excel Solver	0,29	1,00	0,59	1,00	0,04	0,40	1,00

Tablo 4. Normalize Edilmiş Karar Matrisi

Ağırlıklandırılmış karar matrisinin: Bu aşamada kriterlerin önem düzeyini ifade eden kriter ağırlıkları uygulamaya dahil edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisi Tablo 5’de verilmiştir .

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
LpSolveIDE	0,29	0,49	0,03	0,26	0,10	0,04	0,09
WinOSB	0,36	0,34	0,06	0,26	0,20	0,05	0,07
Qm For Windows	0,36	0,57	0,03	0,23	0,18	0,08	0,12
Google Or Tools(Phyton)	0,18	0,36	0,04	0,34	0,14	0,04	0,13
Excel Solver	0,23	0,68	0,05	0,46	0,10	0,06	0,14

Tablo 5. Ağırlıklandırılmış Karar Matrisi

SYA matrisinin kurulması: Bu aşamada her bir kriter için sınır yakınlık alanı değerleri belirlenmiş ve Tablo 6’da sunulmuştur.

	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5	Kriter 6	Kriter 7
gi	0,27	0,47	0,04	0,30	0,14	0,05	0,11

Tablo 6. SYA Matrisi

Alternatiflerin Sınır Yakınlık Alanından uzaklıklarının hesaplanması Tablo 7’de verilmiştir.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
LpSolveIDE	0,01	0,02	-0,01	-0,04	-0,04	-0,01	-0,02
WinOSB	0,09	-0,13	0,02	-0,04	0,06	0,00	-0,04
Qm For Windows	0,09	0,10	-0,01	-0,07	0,04	0,03	0,01
Google Or Tools(Phyton)	-0,09	-0,11	0,00	0,04	0,00	-0,01	0,03
Excel Solver	-0,04	0,21	0,01	0,16	-0,04	0,00	0,03

Tablo 7. Sınır Yakınlık Matrisinin Oluşturulması

Alternatiflerin sıralanması: Son aşamada ise alternatiflerinin sınır yakınlık alanından uzaklıkları (q_i) toplamı kullanılarak alternatiflere ait sıralama elde edilmiş ve Tablo 8’de sunulmuştur.

LpSolveIDE	-0,08
WinOSB	-0,04
Qm For Windows	0,19
Google Or Tools(Phyton)	-0,16
Excel Solver	0,34

Tablo 8. MABAC Yöntemi ile Sıralanmış Alternatifler

3 SONUÇ

Matematiğin yanı sıra özellikle mühendislik alanında çok ilişkisi olan matematiksel modelleme gerçek hayat problemleri ile matematik arasında kritik bir konumda bulunmaktadır. Gelişen teknoloji ile özellikle bilgisayar bilimlerindeki hızlı ilerleme, oluşturulan bu matematiksel modellerin çözümünü daha pratik ve daha etkili kılmaktadır. Bunun yanı sıra matema-

tiksel model çözümleri için ücretsiz bir çok yazılım alternatifi bulunmaktadır. Bu alternatifler kullanıcıya birden fazla tercih sunmakta olup, bilimsel yaklaşımlar ile maksimum faydayı sağlayabilmek için en doğru seçimi yapma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu amaçla, en uygun tercihi seçmek için ÇKKV yöntemlerine başvurulabilir. ÇKKV yöntemlerinin literatürde bilinen farklı çözüm yöntemleri olduğu bilinmektedir. Bunlardan bazıları AHP, MABAC, TOPSİS, ELECTRE gibi yöntemlerdir.

Bu çalışmanın literatüre katkısı iki açıdan ortaya çıkmaktadır. Birincil olarak MABAC yöntemi ile ilgili Türkçe literatürde az sayıda çalışma bulunması, ikincil olarak da ücretsiz olarak sunulan matematiksel model çözümlerinin seçiminin, yazarın bilgisi doğrultusunda, ilk defa ele alınmış olmasıdır. Bu çalışma bahsedilen araştırma boşluklarını doldurarak literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında ilk 5 kriterin en büyük olması istenirken, Kriter6 ve Kriter 7 'nin en küçük olması istenmektedir. Önerilen modelin sonuçlarına göre aday alternatiflerin sıralanması şu şekilde, Excel Solver > Qm For Windows > WinOSB > LpSolveIDE > Google Or Tools(Phyton) ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak 5 ücretsiz matematiksel model çözümleri ve 7 kriter için MABAC yöntemi uygulamasında en iyi alternatifin Excel Solver olduğu gözlemlenmiştir.

Kaynakça

- Anthony, M. & Biggs, N., (1996). *Mathematics for Economics and Finance*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Arslan, H. M., Köse, A. & Durak, İ. (2018). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Eğitim Kurumları Karar Problemlerinin Çözümü. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, ICETID 2018, 27-34.
- Ayık, Y.Z., & Kılavuz, Y. (2013). Analitik Ağ Süreci Yaklaşımı Ve Topsıs Yöntemi İle Öğrenci İşleri Bilgi Sistemi Yazılımı Seçimi. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 27(4), 1-18.
- Ayçin, E., & Çakın, E. (2019). Ülkelerin inovasyon performanslarının ölçümünde ENTROPİ ve MABAC çok kriterli karar verme yöntemlerinin bütünlük olarak kullanılması. *Akdeniz Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 19(2), 326–351.
- Bakır, M. (2019). SWARA ve MABAC yöntemleri ile havayolu işletmelerinde ewom'a dayalı memnuniyet düzeyinin analizi. *İzmir İktisat Dergisi*, 34(1), 51–66.
- Blum, W. & Borromeo Ferri, R. (2009). *Mathematical Modelling: Can it Be Taught and Learnt?*, *Journal of Mathematical Modelling and Application* 1(1), 45-58.
- Boysen N., Flidner M., Scholl A. (2008) Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111 (2), 509-528.
- Cho, K.T. (2003), "Multi criteria Decision Methods: An Attempt to Evaluate and Unify", *Mathematical and Computer Modelling*, 37, 1099-1119.
- Çakır, E. (2018). Elektronik Belge Yönetim Sistemi (Ebys) Yazılımı Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri: Bir Belediye Örneği. *Business Economics and Management Research Journal*, 1 (1), 15-30.
- Çetinyokuş, T. & Özdil, L. (2016). İş Zekası Yazılımı Alternatiflerinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi İle Değerlendirilmesi. *Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi*, 1 (2), 48-61.
- Çınaroğlu, E. (2020). Yenilikçi Girişimlere Ait Faaliyetlerin Entropi Destekli MABAC Yöntemi ile Değerlendirilmesi. *Journal of Entrepreneurship and Innovation Management*, 9 (1), 111-135.
- Deniz, D. & Akgün, L. (2017). Ortaöğretim Matematik Öğretmenlerinin Matematiksel Modelleme Yöntemi ve Uygulamalarına Yönelik Görüşleri. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5 (1), 95-117.
- Ecer, F. (2016). ARAS Yöntemi Kullanılarak Kurumsal Kaynak Planlaması Yazılımı Seçimi. *Journal Of Alanya Faculty Of Business/Alanya İstetme Fakültesi Dergisi*, 8(1), 89-98.

- Ersöz, F. & Kabak, M. (2010). Savunma Sanayi Uygulamalarında Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Literatür Araştırması. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 97-125.
- Fackrell, M., (2009). Modelling healthcare systems with phase-type distributions *Health Care Management Science*, 12 (1), 11-26.
- Genç, T. &, (2013). PROMETHEE Yöntemi ve GAIA Düzlemi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15 (1), 133-154.
- Hanine, M., Boutkhoun, O., Tiknioune, A. & Agouti, T. (2016). Application of an integrated multi criteria decision making AHP TOPSIS methodology for ETL software selection, *SpringerPlus*, 5(1), 263.
- Kuru, A. & Akın, B. (2012). Entegre Yönetim Sistemlerinde Çok Kriterli Karar Verme Tekniklerinin Kullanımına Yönelik Yaklaşımlar Ve Uygulamaları. *Öneri Dergisi*, 10 (38), 129-144.
- Mishra, A.R., Chandel, A. & Motwani, D. (2020). Extended MABAC method based on divergence measures for multi-criteria assessment of programming language with interval-valued intuitionistic fuzzy sets. *Granul. Comput.* 5, 97–117.
- Özbek, A. & Engür, M. (2019). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Öğrenci İşleri Otomasyon Seçimi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21 (1), 1-18.
- Özen, Y.D. Ö., & Koçak, A. (2017). Bulanık Analitik Hiyerarşi ve Bulanık Dematel yöntemleri kullanılarak kurumsal kaynak planlaması yazılım seçimi ve değerlendirilmesi. *Yönetim ve Ekonomi: Celal Bayar Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 24(3), 929-957.
- Pamucar, D., Cirovic, G., (2015). The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC) Expert Systems with Applications, 42, 3016-3028.
- Perçin, S. & Gök, A. (2013). ERP Yazılımı Seçiminde İki Aşamalı AAS-TOPSIS Yaklaşımı. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 8 (2), 93-114.
- Saat, M., (2000). “Çok Amaçlı Karar Vermede Bir Yaklaşım: Analitik Hiyerarşi Yöntemi”, *Gazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 2, 149.
- Sharma, H.K., Roy, J., Kar, S., Prentkovskis, O. (2018). Multi criteria evaluation framework for prioritizing indian railway stations using modified rough AHP-MABAC method. *Transport Telecom Journal*. 19, 113- 127.
- Tunca, M., Aksoy, E., Bülbül, H., & Ömürbek, N. (2015). AHP Temelli Topsis Ve Electre Yöntemleri ile Muhasebe Paket Programı Seçimi. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(1), 53-71.
- Ulutaş, A. (2019). ENTROPİ ve MABAC yöntemleri ile personel seçimi. *OPUS Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, 13(19) , 1552–1573.

- Verschaffel L., Greer B., de Corte E. (2002) Everyday Knowledge and Mathematical Modeling of School Word Problems. In: Gravemeijer K., Lehrer R., Van Oers B., Verschaffel L. (eds) Symbolizing, Modeling and Tool Use in Mathematics Education. Mathematics Education Library, vol 30. Springer, Dordrecht.
- Vesković, S., Stević, Ž., Stojić, G., Vasiljević, M., & Milinković, S. (2018). Evaluation of the railway management model by using a new integrated model DELPHI-SWARA-MABAC. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 1(2), 34–50.
- Yaldır, A. & Özgür Polat, L. (2016). Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri İle Elektronik Belge Yönetim Sistemi Seçimi- Electronic Document Management System Selection With Multi-Criteria Decision Making Techniques. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 8 (14), 88-108.
- Yeşilyurt, B., Karakuş, K., Gür, Ş. & Eren, T. (2019). Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ile Hastane Bilgi Yönetim Sistemleri İçin Paket Programı Seçimi. *Başkent Üniversitesi Ticari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 3 (1), 1-21.
- Yu, S. M., Wang, J., & Wang, J. Q. (2017). An interval type-2 fuzzy likelihood-based MABAC approach and its application in selecting hotels on a tourism website. *International Journal of Fuzzy Systems*, 19(1), 47-61.

Bölüm 14

**PTFE DİELEKTRİK MALZEME YÜZEYİ İÇİN
HİDROFOBİSİTE VE BUHARLAŞMA HIZI
İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ**

Mustafa KARHAN¹

¹ Mustafa KARHAN, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Çankırı, Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-6747-8971, mustafakarhan@gmail.com

1.GİRİŞ

Termoplastikler arasında sınıflandırılan Politetrafloroetilen (PTFE), DuPont laboratuvarlarında Dr. Roy J. Plunkett tarafından keşfedilmiştir. Ticari olarak Teflon olarak adlandırılmaktadır. PTFE, monomer tetrafloroetilen (TFE) polimerize edilir. PTFE formülasyonunda $[(CF_2-CF_2)_n]$ moleküler formülü şeklinde C-F bağına sahiptir. PTFE, güçlü bir şekilde bağlı flor atomları nedeniyle yüksek moleküler ağırlıklı bir bileşiktir ve yarı kristal yapı sergiler. (Dhanumalayan ve Joshi, 2018).

Dünya çapında en çok kullanılan floropolimerden biri olarak kabul edilen Politetrafloroetilen (PTFE), birçok uygulama alanında kendine yer bulmaktadır. PTFE, elektrik uygulamalarında, petrokimya endüstrisinde, kimyasal endüstride, otomotiv endüstrisinde, biyomedikal uygulamalarda, havacılık ve savunma uygulamaları gibi çeşitli alanlarda kullanılan çok yönlü bir malzemedir (Dhanumalayan ve Joshi, 2018; Brown ve Dattelbaum, 2005)

PTFE, mükemmel dielektrik dayanımı (17,2 ile 36 kV.mm⁻¹ arasında) ve termal kararlılığı (260 °C'ye kadar çalışma sıcaklığı) nedeniyle elektriksel yalıtkanlık anlamında en çok kullanılan polimerlerden biridir (Henri v.d., 2020; Ebnesajjad, 2016). PTFE'nin bu özellikleri, kimyasal yapısı ve C-F kimyasal bağ kuvveti ile açıklanabilir ($E_a \approx 500 \text{ kJ.mol}^{-1}$) (Henri v.d., 2020; Conesa ve Font, 2001). PTFE, fiziksel, kimyasal, mekanik, termal, elektriksel ve optik özelliklerinden dolayı mühendislik uygulamalarında tercih edilen ve yaygın bir şekilde kullanılan bir polimerdir. PTFE, düşük yüzey enerjisinden dolayı üstün hidrofobik bir karakter de sergilemektedir (Dhanumalayan ve Joshi, 2018).

Literatürde PTFE malzeme yüzeyine ilişkin ıslanabilirlik davranışı ve buharlaşma ile ilgili olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde farklı damla sızmaları, farklı ortam koşulları ve farklı PTFE kompozitler için temas açısı ölçümleri gerçekleştirildiği görülmüştür.

Dhanumalayan ve Joshi (2018), PTFE ve PTFE kompozitler için farklı hidrofobik değerlerde temas açıları rapor etmişlerdir. Dhanumalayan ve Joshi (2018), yayınladıkları derleme çalışmasında sundukları temas açısı sütun grafiklerinde saf PTFE için temas açısını 108°, PTFE bant için temas açısını 130°, uzatılmış PTFE bant için temas açısını 165° ve PTFE/Ni nanokompozit için ise temas açısını 165° olarak belirtmişlerdir.

Zhang ve arkadaşları (2004), bir Teflon filmi uzatarak süperhidrofobik bir film elde etmek için oldukça basit ama etkili bir yol önermişlerdir. Temas açısının, yaklaşık olarak uzatılarak 118°'den 165°'e yükseltilebildiğini göstermişlerdir. Teflon bandın uzama oranının bir fonksiyonu olarak temas açısı ve su damlacıklarının karşılık gelen şekillerini göstermişlerdir.

Yoğunluğu azaltmanın (yani, lifler arası kristal mesafesini artırmanın) su geçirmezliği iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Sundukları yöntemin, çok çeşitli kristal malzemelerden süper hidrofobik yüzeyler hazırlamak için başarıyla kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Shi ve arkadaşları (2009), su-etanol karışımlarının PTFE yüzeyler üzerindeki ıslanma ve buharlaşma davranışlarını, konsantrasyonun etkisine vurgu yaparak incelemişler ve saf maddelerden farklı olduklarına işaret etmişlerdir. Temas açısı, damla yüksekliği ve temas çapındaki değişiklikleri kabaca üç aşamaya ayrılabilirdiğini göstermişlerdir.

Bu çalışma kapsamında üstün elektriksel, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılan ve elektriksel yalıtkan bir malzeme olan PTFE dielektrik malzemeyi temsilen PTFE (Teflon) bant numune kullanılmıştır. Teflon bant numune yüzeyi için temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

2. TEMAS AÇISI, ISLANABİLİRLİK DAVRANIŞI VE BUHARLAŞMA HIZI

Thomas Young (1805) tarafından tanımlanan ıslanabilirlik kavramı katı-sıvı etkileşimlerini belirlemeye imkân sağlamaktadır. Islanabilirlik, yüzey ile su damlası arasındaki temas açısı olarak adlandırılan açı ile açıklanabilen temel bir yüzey özelliğidir. Katı yüzeyleri karakterize etmeye yardımcı olan ıslanabilirlik kavramı malzemelerin temel özellikleri arasındadır ve yüzey mühendisliğinde aktif ve önemli bir rol oynamaktadır. Bir yüzeyin ıslanabilirliği (hidrofobikliği / hidrofilikliği), üç yüzey geriliminin (sıvı yüzey gerilimi, katı yüzey gerilimi ve sıvı-katı ara yüzey gerilimi) arasındaki mekanik bir dengenin sonucunda oluşan temas açısı ile açıklanmaktadır (Law ve Zhao, 2016; Karhan, 2021). Temas açısı ölçümleri, ıslanabilirlik davranışının belirlenmesinde ve değerlendirilmesinde aktif rol oynar.

Hem kimyasal bileşim hem de yüzeyin geometrik mikro yapısı tarafından yönetilen katı yüzeylerin ıslanabilirliği önemli bir özelliktir. Hidrofobisite, hidrofilsite, temas açısı, ıslanabilirlik ve buharlaşma hızı kavramları birçok farklı mühendislik alanı içerisinde karşımıza çıkan ve kendine önemli bir yer bulan kavramlardır. Dielektrik malzemelerin hidrofilik ve/veya hidrofobik karakterleri malzemenin ömrünü ve servis süresini tayin edebilmektedir. Elektrik alan ve nem varlığında elektriksel yaşlanma olaylarının başladığı, hızlandığı ve büyüdüğü göz önünde bulundurulduğunda elektriksel yalıtkan malzemelerde hidrofobisitenin önemli bir kavram olduğu aşikardır. Bu bağlamda, PTFE dielektrik malzeme yüzeyi için ıslanabilirlik davranışı, temas açısı, buharlaşma hızı arasındaki korelasyon incelenmiştir.

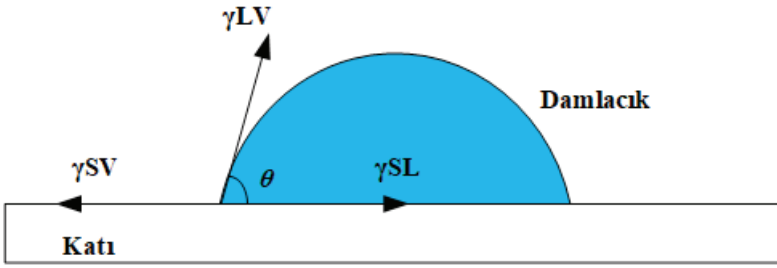
Temas açısı, Young denklemi ile ifade edilmektedir. Aynı zamanda Young açısı veya statik temas açısı olarak tanımlanan temas açısı için eşitlik Eş. 1’de verilmiştir. Şekil 1’de katı bir yüzey üzerine bırakılan damla için temas açısı ve yüzey gerilimlerine yer verilmiştir.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

γ_{SV} : Katı yüzey gerilimi

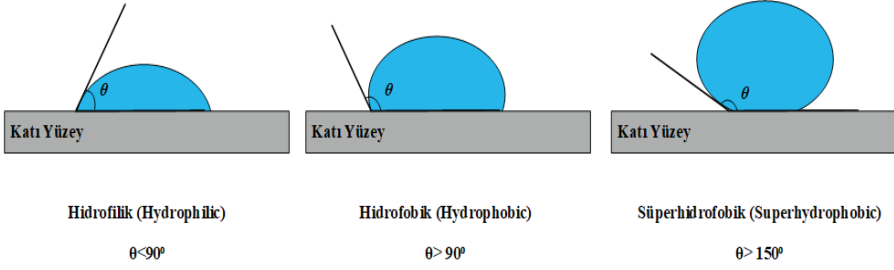
γ_{LV} : Sıvı yüzey gerilimi

γ_{SL} : Sıvı-katı ara yüzey gerilimi



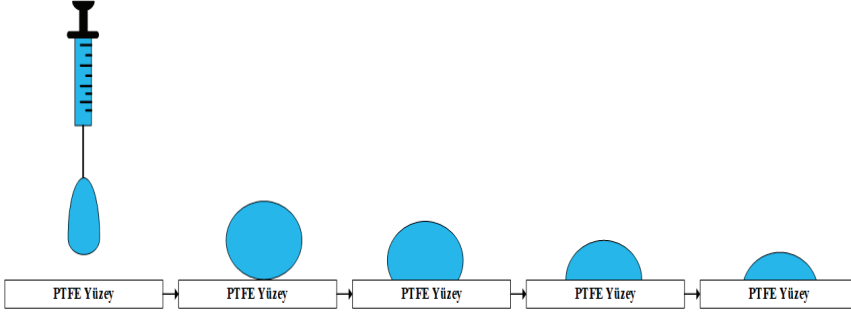
Şekil 1. Durağan damla, yüzey gerilimleri ve temas açısı

Katı bir yüzeyin ıslanabilirlik karakteristiği (hidrofobisite ve hidrofilisite) mühendislik uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Yüzeylerin ıslanabilirlik davranışları hakkında değerlendirme ve yorum yapılmasına imkân veren temas açısı değeri 90° 'den düşük ise yüzey hidrofilik, 90° 'den büyük ise hidrofobik, 150° ile 180° arasında ise süperhidrofobik özellik gösterir. Katı bir yüzeyin ıslanabilirliği yüzeyin kimyasal özelliklerine ve mikro yapısına bağlı bir özelliktir. Temas açısı; yüzey gerilimi, pürüzlülük, buharlaşma, malzeme cinsi, yüzey temizliği, ortam parametreleri, damlatılan sıvının cinsi ve molaritesi, damla hacmi gibi birçok faktöre bağlıdır (Law ve Zhao, 2016; Karhan 2021). Şekil 2’de hidrofilik, hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeyler şematize edilerek gösterilmiştir. Şekil 2’de de gösterildiği üzere ölçülen temas açısının (θ) 90° 'den küçük veya büyük olma durumuna göre malzeme yüzeyinin hidrofilisitesi veya hidrofobisitesi hakkında değerlendirme yapılabilmektedir.



Şekil 2. Hidrofilik, hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeyler

Şırıngadan bırakılan su damlacığının katı yüzey üzerinde durağan bir damla şeklini alması ve zamanla birlikte buharlaşma nedeniyle damlanın hacminde, yüksekliğinde, yarıçapında ve temas açısındaki azalması Şekil 3'te şematize edilerek gösterilmiştir.



Şekil 3. Durağan damla oluşumu ve buharlaşma nedeniyle damlacıkta hacimsel küçülme

Islanabilirlik ile önemli seviyede ilintisi bulunan buharlaşma hızı, çip üzerinde laboratuvar (lab-on-chip) gibi birçok modern teknolojiye kendine yer bulan ve önemli bir rol üstlenen bir kavramdır. Durağan damlanın buharlaşma hızı; ıslanabilirlik, damlacık boyutu, bağıl nem, damlacık yarıçapı ve yüksekliği, pürüzlülük, temas açısı, ortam sıcaklığı, elektrik alanı, damlacık sıvısı, atmosferik basınç ve difüzyon katsayısı gibi birçok faktöre bağlıdır (Misyura, 2021; Misyura v.d., 2019; Misyura, 2020; Chakraborty v.d., 2017; Semenov v.d., 2014; Hu ve Larson, 2002; Girard v.d., 2008; Hu v.d., 2014).

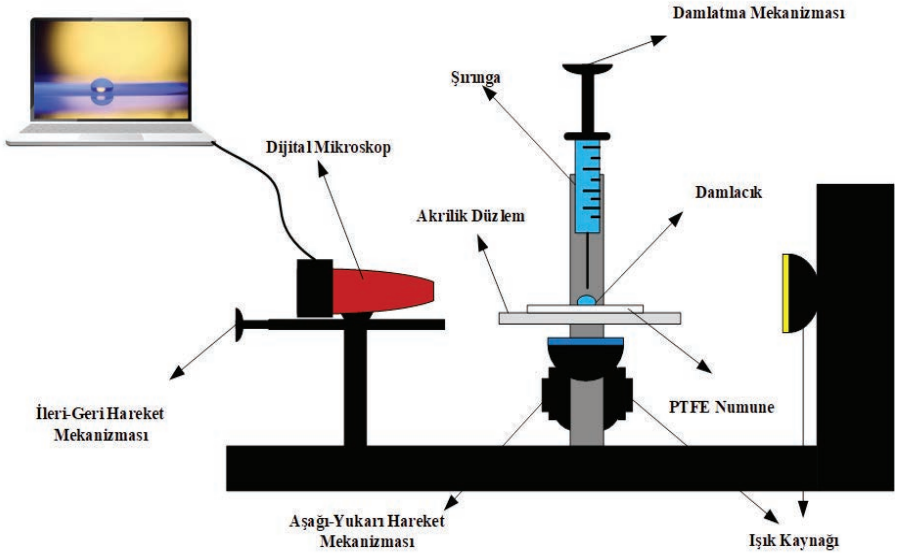
Zamana bağlı olarak, buharlaşma nedeniyle damlacığın yarıçapında ve yüksekliğinde ve dolayısıyla hacminde bir azalma olacaktır. Buharlaşma sırasında durağan bir damlacığın hacmi $V(t)$ (küresel bir parça olduğu varsayımında) şu şekilde ifade edilebilir:

$$V(t) = \frac{\pi r^3}{3} \left(\frac{2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} \right) \quad (2)$$

$V(t)$, zamana bağlı parametreler olan temas açısı (θ) ve yarıçapın (r) bir fonksiyonudur (Zhong v.d., 2017; Hu ve Larson, 2002; Birdi v.d., 1989; Schrader ve Weiss, 1987).

3. TEFLON BANT NUMUNE YÜZEYİ İÇİN TEMAS AÇISI ÖLÇÜMLERİ

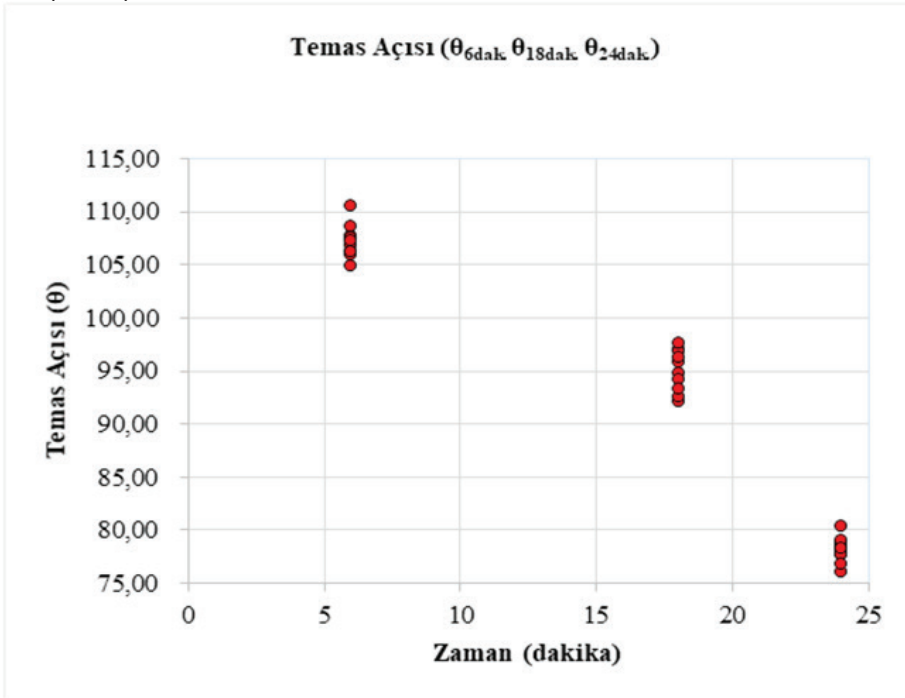
Bu çalışmada model malzemesi olarak farklı üreticilerin ürettiği ticari Teflon bant numuneler seçilmiştir. Seçilen bu numunelerden net görüntüler alınabilmesi ve doğru ölçümlerin yapılabilmesi adına pürüzsüz akrilik malzeme üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 4'te PTFE dielektrik malzeme yüzeyi için ıslanabilirlik ve buharlaşmanın incelenmesine yönelik olarak teflon bant numune yüzeyine destile su damlacıklarının bırakıldığı ve damlacık görüntülerinin alındığı platforma yer verilmiştir. Teflon bant numune yüzeyinden damlacık görüntüleri Celestron 44308 dijital mikroskop yardımıyla alınmıştır.



Şekil 4. Teflon bant yüzeyinden damlacık görüntüsü almak için tasarlanmış uygulanan platform

Teflon bant numune yüzeyi için temas açısı ölçümleri gerçekleştirilirken Karhan'ın (Karhan, 2021) geliştirdiği MATLAB yazılım platformunda hazırlanan kullanıcı arayüzü kullanılmıştır. Geliştirilen bu GUI (graphi-

cal user interface - grafiksel kullanıcı arayüz) temas açısı hesaplamalarını yarım açı yöntemini kullanarak yapmaktadır. Bununla birlikte ölçümlerin gerçekleştirildiği bu arayüze eklenen buton yardımıyla da literatürde genel kabul görmüş ve temas açısı ölçümlerinde yaygın bir şekilde kullanılan ImageJ yazılımı da çağrılıp çalıştırılabilmektedir. ImageJ çağrılıp koştu-rularak LB-ADSA (Low-Bond Axisymmetric Drop Shape Analysis) ve DropSnake eklentileri de kullanılmıştır. Böylelikle temas açısı ölçümleri tekrar tekrar yapılarak doğrulanmıştır. Gerçekleştirilen temas açısı ölçüm değerleri uyumluluk ve tutarlılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Teflon bant numunelerin yüzeyine damlatılan 20 μL hacime sahip su damlacığı için temas açısı değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Temas açısı ölçümleri ger-çekleştirilirken ortam sıcaklığı $24,8\pm 0,5$ °C, nem ise $\%23\pm 1$ RH olarak ölçülmüştür.



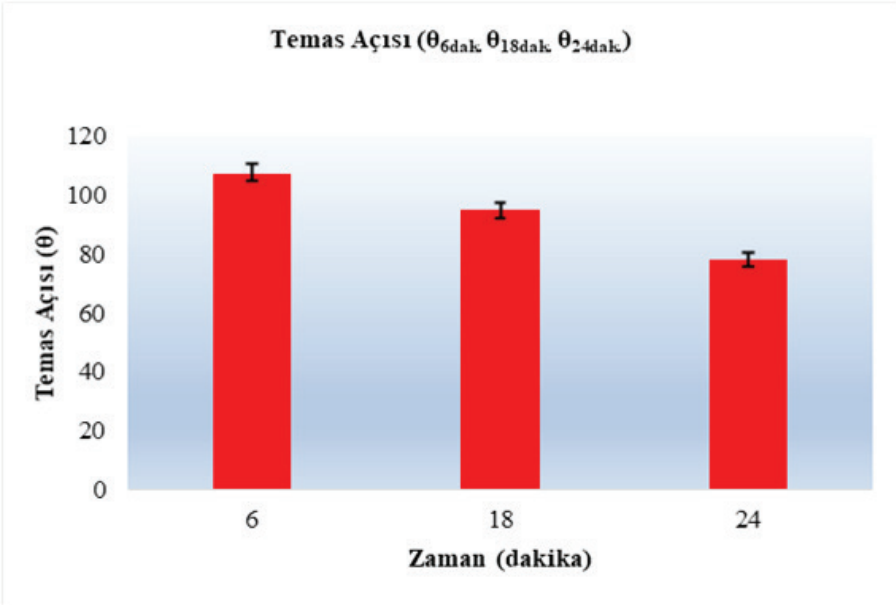
Şekil 5. 6., 18. ve 21. dakikalarda Teflon bant numune yüzeyi için ölçülen temas açılarının saçılım grafiği

Teflon bant numune yüzeyi için 6., 18. ve 24. dakikalarda 10 farklı ölçüm alınmıştır. Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda 6., 18. ve 24. dakikalar için ortalama temas açısı değerleri $\theta_{\text{ort-6dak}}=107,19^\circ$, $\theta_{\text{ort-18dak}}=95,06^\circ$ ve $\theta_{\text{ort-24dak}}=78,14^\circ$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen temas açısı değerleri için standart sapma $\sigma_{6\text{dak}}=1,604$, $\sigma_{18\text{dak}}=1,971$ ve $\sigma_{24\text{dak}}=1,207$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 5'te farklı zaman noktalarında ölçülen temas açısı değerleri için uydurulan polinomsal eğrinin (2. derece) matematiksel ifadesi Eş. 3'te

verilmiştir. Uydurulan bu quadratic eğri için $R^2 = 0,9835$ olarak hesaplanmıştır.

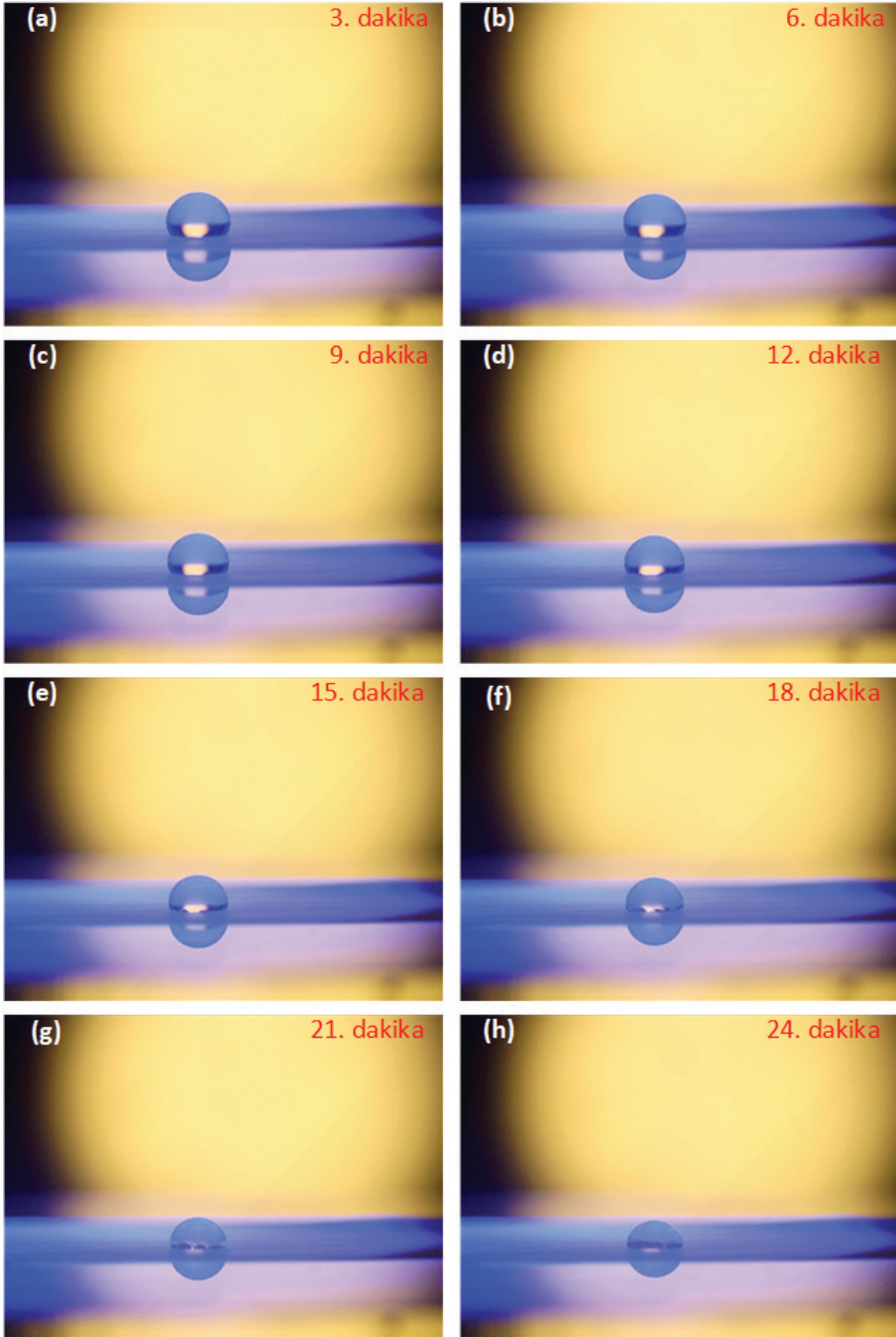
$$y = -0,1005x^2 + 1,4029x + 102,39 \quad (3)$$

Şekil 6’da 6., 18. ve 24. dakikalarda Teflon bant numune yüzeyi için ölçülen temas açılarının ortalama değerlerinin sütun grafiğine ve bu ortalama değerlerin ölçülen maksimum ve minimum değerlere olan uzaklıklarına yer verilmiştir.



Şekil 6. 6., 18. ve 24. dakikalarda Teflon bant numune yüzeyi için ölçülen temas açılarının sütun grafiği

Teflon bant numune yüzeyinden farklı anlarda damlacık görüntüleri alınmıştır. 3., 6., 9., 12., 15., 18., 21. ve 24. dakikalarda Teflon bant numune yüzeyinden alınan damlacık görüntüleri Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7’de gösterildiği üzere buharlaşmadan kaynaklı damlacık hacminde belirgin bir şekilde azalmalar gözlemlenmiştir. Teflon bant numune yüzeyine bırakılan damlacık için ölçülen temas açısı değerinin uzunca bir zaman hidrofobik bir karakter sergilediği gözlemlenmiştir. Doğal buharlaşma nedeniyle damlacığın taban yarıçapında ve yüksekliğinde değişiklikler gözlemlenmiştir. Damlacığın taban çapındaki değişim, damlacığın yüksekliğindeki değişimin yanında ihmal edilebilecek seviyelerdedir.



Şekil 7. Teflon bant numune yüzeyinden a) 3. b) 6. c) 9. d) 12. e) 15. f) 18. g) 21. ve h) 24. dakikalarda alınan damlacık görüntüleri

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında üstün dielektrik dayanımı ve termal kararlılığı nedeniyle elektriksel yalıtkan olarak kullanılan polimerlerden biri olan PTFE malzemeleri temsilen PTFE (Teflon) bant yüzeyi için temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda PTFE dielektrik malzeme yüzeyi için ıslanabilirlik ve buharlaşma hızı incelenmiştir. Elektrik alan ve nem varlığında elektriksel yaşlanma olaylarının başladığı, hızlandığı ve büyüdüğü göz önünde bulundurulduğunda elektriksel yalıtkan malzemelerde hidrofobisitenin önemli bir kavram olduğu aşikardır.

PTFE dielektrik malzeme yüzeyi için temas açısı değerleri hidrofobik değerler aldığı gözlemlenmiştir. Damlacığın PTFE malzeme yüzeyine bırakıldıktan sonra durağan bir hal almasıyla birlikte uzunca bir süre ölçülen temas açısı değerlerinin hidrofobik değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Zamanla birlikte buharlaşmanın da etkisiyle damlacık yüksekliğinde ve temas açısında azalmalar gözlemlenmiştir. Damlacık yarıçapında meydana gelen azalmanın yükseklikte meydana gelen azalmanın yanında çok az olduğu gözlemlenmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, PTFE bant ve hazırlanacak çeşitli PTFE kompozit yüzeylerine farklı türde ve farklı molaritelerde damlacık sıvıları için temas açıları ölçülüp karşılaştırılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Birdi, K. S., Vu, D. T., & Winter, A. (1989). A study of the evaporation rates of small water drops placed on a solid surface. *The Journal of physical chemistry*, 93(9), 3702-3703.
- Brown, E. N., & Dattelbaum, D. M. (2005). The role of crystalline phase on fracture and microstructure evolution of polytetrafluoroethylene (PTFE). *Polymer*, 46(9), 3056-3068.
- Chakraborty, S., Rosen, M. A., & MacDonald, B. D. (2017). Analysis and feasibility of an evaporative cooling system with diffusion-based sessile droplet evaporation for cooling microprocessors. *Applied Thermal Engineering*, 125, 104-110.
- Conesa, J. A., & Font, R. (2001). Polytetrafluoroethylene decomposition in air and nitrogen. *Polymer Engineering & Science*, 41(12), 2137-2147.
- Dhanumalayan, E., & Joshi, G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 247-268.
- Ebnesajjad, S. (2016). *Expanded PTFE applications handbook: Technology, manufacturing and applications*. William Andrew.
- Girard, F., Antoni, M., Faure, S., & Steinchen, A. (2008). Influence of heating temperature and relative humidity in the evaporation of pinned droplets. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 323(1-3), 36-49.
- Henri, V., Dantras, E., Lacabanne, C., Dieudonne, A., & Koliatene, F. (2020). Thermal ageing of PTFE in the melted state: Influence of interdiffusion on the physicochemical structure. *Polymer Degradation and Stability*, 171, 109053.
- Hu, D., Wu, H., & Liu, Z. (2014). Effect of liquid–vapor interface area on the evaporation rate of small sessile droplets. *International journal of thermal sciences*, 84, 300-308.
- Hu, H., & Larson, R. G. (2002). Evaporation of a sessile droplet on a substrate. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(6), 1334-1344.
- Karhan, M. (2021). Experimental investigation of wettability and evaporation for the surface of PMMA dielectric material used in high-voltage applications and outdoor electrical applications. *Applied Physics A*, 127(6), 1-11.
- Law, K. Y., & Zhao, H. (2016). *Surface wetting: characterization, contact angle, and fundamentals*. Basel, Switzerland: Springer International Publishing.
- Misyura, S. Y. (2020). Heat transfer and convection of evaporating sessile droplets in transition from superhydrophilic to superhydrophobic structured wall: Optimization of functional properties. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 112, 104474.

- Misyura, S. Y. (2021). The dependence of drop evaporation rate and wettability on corrosion kinetics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 610, 125735.
- Misyura, S. Y., Kuznetsov, G. V., Feoktistov, D. V., Volkov, R. S., Morozov, V. S., & Orlova, E. G. (2019). The influence of the surface microtexture on wettability properties and drop evaporation. *Surface and Coatings Technology*, 375, 458-467.
- Schrader, M. E., & Weiss, G. H. (1987). Free energy and vapor pressure of sessile drops. 1. Rapidly established contact angle equilibrium. *Journal of Physical Chemistry*, 91(2), 353-356.
- Semenov, S., Trybala, A., Rubio, R. G., Kovalchuk, N., Starov, V., & Velarde, M. G. (2014). Simultaneous spreading and evaporation: recent developments. *Advances in colloid and interface science*, 206, 382-398.
- Shi, L., Shen, P., Zhang, D., Lin, Q., & Jiang, Q. (2009). Wetting and evaporation behaviors of water-ethanol sessile drops on PTFE surfaces. *Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films*, 41(12-13), 951-955.
- Young, T. (1805). III. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical transactions of the royal society of London*, (95), 65-87.
- Zhang, J., Li, J., & Han, Y. (2004). Superhydrophobic PTFE surfaces by extension. *Macromolecular Rapid Communications*, 25(11), 1105-1108.
- Zhong, X., Ren, J., & Duan, F. (2017). Wettability effect on evaporation dynamics and crystalline patterns of sessile saline droplets. *The Journal of Physical Chemistry B*, 121(33), 7924-7933.

Bölüm 15

**İSTATİSTİK VE DERİN ÖĞRENME
YÖNTEMLERİ KULLANILARAK HASTA
RADYOLOJİK GÖRÜNTÜ SAYILARININ
GELECEK TAHMİNLERİNİN
YAPILMASI**

Erkan YALDIZ¹

¹ * Bu çalışma yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir, Temmuz, 2021.

Muş Alparslan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri ABD, erkanlyaldiz@gmail.com

1. Giriş

Yarınlara daha donanımlı olarak hazırlanmak için mutlak suretle geçmiş tecrübelerden faydalanmak ve geçmiş süzgecinden geçmek gerekmektedir. Geçmiş bilinmeden geleceğe hazırlanmak istenilen neticeyi veremeyecektir. Dolayısıyla hayatın her alanında geçmişe bakarak geçmişten ders çıkarma ve daha emin adımlarla geleceğe hazırlıklı olarak yürüme oldukça büyük önem arz etmektedir.

Zaman serileri tahmin analizi eldeki verilerden hareketle gelecek verileri tahmin etme sürecine dayanmaktadır. Son zamanlarda yapay zekâ alanındaki gelişmeler (F. Jiang et al., 2017; Kulkarni, Seneviratne, Baig, & Khan, 2020; Zeydin Pala & Özkan, 2020; van Assen et al., 2020) ve bu alanın birer alt dalı olan makine öğrenmesi (Alfaras, Soriano, & Ortín, 2019; Gidon, Pei, Bonzanini, Graves, & Mesbah, 2019) ve derin öğrenme alanlardaki derinlemesine çalışmalar (Z. Pala, Yamli, & Ünlük, 2017; Zeydin Pala & Şana, 2020) birçok uygulamada olduğu gibi tahmin uygulamalarında da önemli mesafeler kat etmiştir. Zaman serileri ekonomik büyüme tahminlerinde (Ak, Fink, & Zio, 2016), fiyat/satış tahminlerinde (Özgüner, Tör, & Güven, 2017), sağlıkta (Yaldız & Pala, 2019; Zhang et al., 2020), güneş lekeleri tahmininde (Atıcı & Pala, 2021; Zeydin Pala & Atıcı, 2019) ve radyasyon tahmini (Z. Pala, Ünlük, & Yaldız, 2019; Z Pala, 2019a; Zeydin Pala, 2021; Sorkun, 2018) gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Literatürde zaman serilerinin tahmin işlemi için istatistiksel ve makine öğrenmesi (Z Pala, 2019a; Ünlük & Pala, 2019) metotları olmak üzere iki farklı temel yaklaşım kullanılmaktadır (Zeydin Pala & Pala, 2020). Birbirlerinden tamamen farklı olan bu iki yaklaşım aynı amaç için kullanılmaktadırlar. Bu iki yöntemin kullanıldığı hibrid uygulamalar da mevcuttur (Z Pala, 2019b) . Zaman serisi tahmin işlemlerinde kullanılan bu iki yaklaşımın kuvvetli yanları olduğu gibi zayıf yanları da bulunmaktadır. Dolayısıyla her iki yaklaşımdan da tahmin işlemlerinden mükemmel performans beklemek olası değildir.

Literatürde tahmin işlemleri için kullanılan veri seti için doğru metodu seçmenin zorluğuna da işaret edilmektedir (Brockwell ve Davis, 2016). Bundan dolayı her veri seti için süper tahmin yapabilecek bir metot bulunmamaktadır (Wolpert ve Macready, 1997).

Sağlıklı bir geleceğin kurulması şüphesiz sağlıklı bireylerin yetiştirilmesi ile mümkün olmaktadır. Geçmişten gelen araştırmalara günümüzde yenileri eklenerek devam etmektedir. Hastaneler ve hastane birimlerinin sağlıklı işleme için de çok sayıda araştırma yürütülmektedir. Hastane birimlerinin performansları ve hasta odaklı çalışmaları oldukça önemlidir. Hastane ortamında tanı amaçlı olarak çok sayıda cihaz kullanılmaktadır.

Teknolojik yeniliklerin hızla gelişmesi ile birlikte sağlık çalışanlarının en büyük yardımcıları olan görüntüleme cihazlarına son yıllarda talep oldukça artmıştır. Görüntüleme cihazlarının çeşitliliği ve sayısı hasta potansiyelini etkilemektedir. Ancak görüntüleme cihazlarına olan talebin geçmiş dönemlere bakılarak hasta potansiyeline göre belirlenmesi, planlanması ve geleceğe hazır olması oldukça büyük önem arz etmektedir. Nasıl ki bir işletmede yetkili kişi belli dönem aralıklar ile müşteri potansiyelini ve müşteri profili noktasında tahmin süreçlerine başvurma gereği duyuyorsa hasta birimleri için de aynı şeyleri söylemek mümkündür.

Literatürde, acil biriminin hasta akışının tahminiyle ilgili çalışmalar yeterli sayıda olmasına rağmen özellikle radyolojideki görüntü sayılarının tahminiyle ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Yazarlar yaptıkları çalışmada (Jones et al., 2019) üç ayrı hastanenin 2005-2007 yılları arasındaki verilerini kullanarak acil departmanının günlük hasta yoğunluğunu ARIMA, ANN gibi modeller ile 30 günlük tahminler yapmışlardır. Regresyon tabanlı modellerin günlük tahmin işleminde daha başarılı olduklarını ifade etmişlerdir.

Başka bir çalışmada (Jones et al., 2019) UK’de dört hastaneden tedarik ettikleri Ocak-2011-Aralık-2015 arasındaki günlük zaman serisi verilerini kullanarak acil polikliniğine gelen hasta tahmini yapmak için sezgisel tabanlı bulanık mantık modelini tanımlamışlardır. Tahmin işleminde ARIMA ve neural networks modellerini kullanmışlardır. Tahmin performanslarını değerlendirmek için mean absolute percentage errors (MAPE) ve root mean square errors (RMSE) metriklerini kullanmışlardır. Özellikle kısa süreli tahminler için model performansının kabul edilebilir aralıkta olduğunu ifade etmişlerdir.

Harrou ve arkadaşları (Harrou, Dairi, Kadri, & Sun, 2020) çalışmalarında variational autoencoder (VAE) algoritmasını kullanarak acil durum servisindeki günlük ve saatlik ziyaretleri zaman serilerini kullanarak derin öğrenme frameworkları yardımıyla tahmin etmeye çalışmışlardır. Yazarlar sonuçlarında, VAE modelinin diğer derin öğrenme algoritmalarından daha iyi bir performans sergilediğini ifade etmişlerdir.

Yazarlar kendi çalışmalarında (Xu, Tsui, Jiang, & Guo, 2016) ARIMA ve LR’yi ardışık bir şekilde birleştiren hibrit bir otoregresif entegre hareketli ortalama doğrusal regresyon (ARIMA-LR) yaklaşımı önermişlerdir. Hibrit yaklaşımın tahmin performansını elde ettikleri gerçek verisetlerini kullanarak karşılaştırmışlardır. Önerilen hibrit ARIMA-LR modeli ile tahmin doğruluğu açısından mevcut modellerden daha iyi performans gösterdiğini göstermişlerdir.

Golmohammadi ve arkadaşları (Golmohammadi, 2016) çalışmaların-

da yerel bir hastanenin acil servisinden alınan ikincil verileri kullanarak logistic Regression ve neural networks yardımıyla, karar destek aracı olarak kullanılabilir ve acil servislere yatkınlığı azaltmaya yardımcı olacak bir tahmin modeli geliştirmişlerdir. Sonuçta, çalışmalarının hasta kabul olasılığını doğru bir şekilde tahmin edebildiğini ve böylece hastane operasyonlarında önemli sorunlar olan acil servise biniş ve tıkanıklığı azalttığını ifade etmişlerdir.

Shahid ve arkadaşları (Shahid, Manzoor, Ibrahim, Ahmed, & Fiaz, 2016) yaptıkları çalışmada, radyoloji birimine ultrasound için gelen hastaların 2001-2015 yılları arasındaki dataları aylık zaman seri olarak tedarik etmişler ve ARIMA modelini kullanarak Haziran 2015-Mayıs 2017 aralığında aylık tahmin yapmışlardır. Sonuç olarak uzun ve kısa vadeli tahminlerde ARIMA modelinin oldukça iyi performans sergilediğini ifade etmişlerdir.

Diğer bir çalışmada (Zhang et al., 2020) 2013-2016 arasındaki dört yıllık veriyi Radiology Information System (RIS) of West China Hospital (WCH) temin etmişlerdir. Günlük tahmin işlemi için ARIMA, lasso, linear-SVR, radial-SVR, random forest ve adabost modellerini kullanmışlardır. Model performanslarını değerlendirmek için MAPE metriğini tercih etmişlerdir. Kullanılan modeller içinde ARIMA modelinin daha başarılı olduğunu ifade etmişlerdir.

Mevcut çalışmalardan farklı olarak hastanenin tüm noktalarından radyoloji birimine sevk edilen hastaların aylık radyolojik vaka tahminini çoklu zaman serisi modelleriyle yapmak ve bunun gelecekteki etkilerini araştırmak bu çalışmanın literatüre katkısı olmaktadır.

Literatürdeki tahmin işlemleri ile alakalı darboğazlar dikkate alınarak bu çalışmada radyolojik görüntü sayılarına dayalı verisetin tahmin işlemi gerçekleştirilecektir. Mevcut çalışmada tanı araçlarının başından gelen radyolojik görüntüleme taleplerinin aylık olarak hangi oranlarda arttığını ve gelecekte hastanenin bu talebe karşı hazırlıklı olması için hangi adımları atması gerektiğini bir problem olarak kabul ettik. Söz konusu problemin çözümü için geçmiş verileri kullanarak teknoloji harikası algoritmalarla tahminler yapmaya çalıştık.

Daha anlaşılır bir ifadeyle verilerin elde edildiği hastanenin bir sonraki hasta potansiyellerini görmelerini ve bu sayede hastalara daha iyi hizmet vermelerini hem istatistiksel hem de derin öğrenme tahmin modellerinden yapılan çalışmaların hangisinin daha fazla katkı sağlayacağı tespit etmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu bölümde 2010-2020 yılları arasında Muş Devlet Hastanesine başvuran ve radyolojik görüntüleme istenen hasta istatistikleri yer almaktadır. Elde edilen veriler Muş Devlet Hastanesi Bilgi İşlem Servisinden temin edilmiştir.

Radyolojik görüntü sayılarının tahmin işlemleri için R programlama ve geliştirme ortamında hem istatistik tabanlı hem de derin öğrenme tabanlı modeller kullanılmıştır. Kullanılan istatistik tabanlı modeller AUTO-ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average)(Gopakumar, Tran, Luo, Phung, & Venkatesh, 2016), ETS (Exponential Smoting), STL (Seasonal and Trend Decomposing Time Losess) (Z. Pala et al., 2019), SES (Simple Exponential Smoting) (Siami-Namini, Tavakoli, & Siami Namin, 2019), TBATS (Exponential smoothing state space model with Box-Cox) (Kalantari, 2021), HOLT-WINTERS (Calegari et al., 2016; Koehler, Snyder, & Ord, 2001), THETAF (Theta method forecast) olarak sıralanırken derin öğrenme tabanlı modeller ise , ELM (Extreme learning machine) (Ak et al., 2016), MLP (Multiplayer Perceptrons) (Ak et al., 2016), NNAR (Neural network Autoregression) (Kalantari, 2021; Zeydin Pala & Atici, 2019; Sena & Nagwani, 2016) olarak sıralanmaktadır.

Tahmin modellerinin performanslarını değerlendirmek için de MAPE (Mean Absolute Percentage Error) (Calegari et al., 2016; Kim & Kim, 2016), MASE (Mean Absolute Scaled Error) (Hyndman & Koehler, 2006), MAE (Mean Absolute Error) (Hyndman & Koehler, 2006; Willmott & Matsuura, 2005) ve RMSE (Root Mean Squared Error) (S. Jiang, Chin, & Tsui, 2018; Willmott & Matsuura, 2005) metrikleri kullanılmıştır.

2.1 Veri Bilgileri

Muş Devlet Hastanesi Bilgi İşlem Servisinden elde edilen 2010-2020 yılları arasında 132 aylık veriler Tablo 1' de gösterilmiştir. Veriler aylık olarak radyoloji biriminde çekilen bilgisayarlı tomografi, röntgen, ultrason, manyetik rezonans ve mamografi adetlerinden oluşmaktadır. Kullanılan 11 yıllık, 132 aylık verilerin istatistiksel dağılımı en küçük, en büyük, medyan ve ortalama sırasıyla 36, 47608, 6480 ve 1704 dir.

Elde edilen aylık veri seti kullanılarak tahmin işlemleri için farklı oranlarda eğitim ve test verisi ayrılmak kaydıyla dört farklı analiz yapılmıştır.

Tablo 1 Çalışmada kullanılan 11 yıllık, 12-aylık veri seti

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2010	77	79	92	114	143	132	159	60	38	89	86	104
2011	140	124	59	54	49	152	309	249	102	36	52	54
2012	264	220	411	367	288	233	179	354	359	86	127	773
2013	523	885	861	950	1115	1195	1098	1392	585	2135	2234	2263
2014	1801	1525	3067	4790	5729	6653	5946	6510	6502	6789	6458	6209
2015	4832	4581	5209	5629	6631	6106	6163	6195	5950	6040	6176	8196
2016	23234	29896	32182	27434	27841	26933	24059	31950	22590	27610	28876	27127
2017	34016	31509	38088	32529	32723	27676	35786	32611	31816	33939	32767	32483
2018	39272	38523	40833	37888	39298	32236	39422	34717	37793	35617	36369	43061
2019	42609	40440	42165	40557	38071	36434	45751	38113	41932	45534	43160	47608
2020	45406	42973	36200	14654	17985	35698	38530	37209	36311	37210	37213	38855

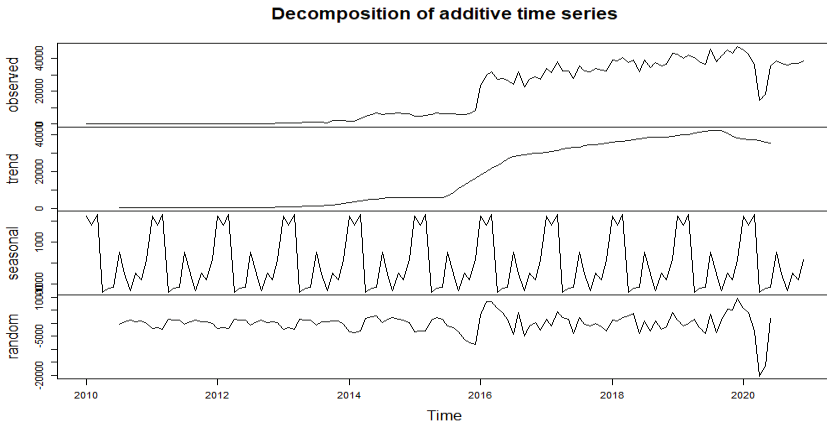
2.2 Tahmin analizleri

Tahmin analizleri için kullanılan 132-aylık veri seti öncelikle ayrıştırma modeli yardımıyla dört bileşene ayrılmıştır.

$$\hat{X}_t = T_t + S_t + R_t + \epsilon_t \quad (2.1)$$

Burada \hat{X}_t , t zamanında modellenen veya tahmin edilen değeri, T_t , t zamanındaki trend bileşenini, S_t , t zamanındaki mevsimsel bileşeni, R_t , t zamanındaki kalan bileşeni ve ϵ_t terimini ise t zamanındaki hatayı temsil etmektedir.

Söz konusu bileşenler veri (observed), trend (trend), mevsimsellik (seasonal) ve düzensiz bileşenler (random) olarak Şekil 1’deki gibi görülmektedir.



Şekil 1 2010-2020 yıllarına ait 132-aylık veri setinin ayrıştırma grafiği

Devam eden kısımda iki farklı yaklaşımla tahminler yapılmıştır. Birinci yaklaşımda her defasında test/egitim oranı değiştirilmek suretiyle se-

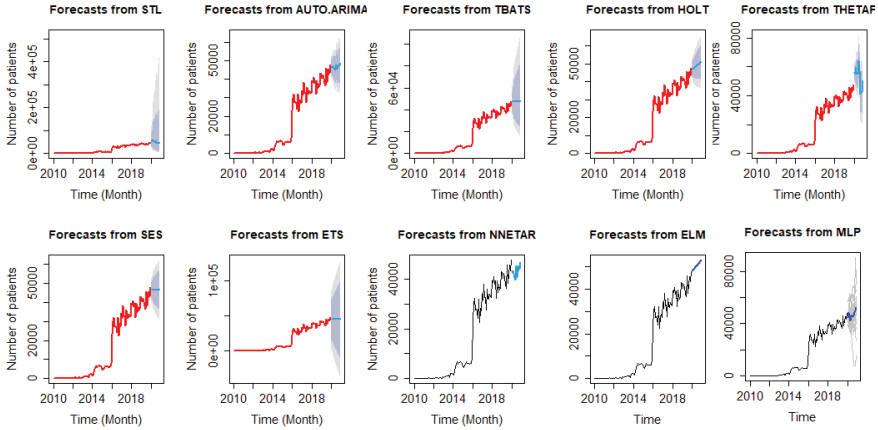
kiz farklı analiz yapılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. İkinci yaklaşımda ise zaman serisi çapraz doğrulama modeli kullanılarak yapılan analizlerin ortalaması alınmıştır.

2.2.1 12-aylık tahmin analizleri: Zaman serisinin 120-aylık eğitim/12-aylık test için ayrılması

Tablo 2’de verildiği gibi eğitim test bölümlenmesinde 120 aylık eğitim ve 12 aylık test verisine ayrılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Tahmin grafikleri Şekil 2’da verilmiştir.

Tablo 2 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) model performanslarını karşılaştırmak amacıyla 12-aylık tahmin sonucunda elde edilen RMSE, MAE, MAPE ve MASE hata metrik değerleri

Model Adı	12 aylık tahminler için, veri setinin %91’i (120 aylık) eğitim %9’u (12 aylık) test için ayrılmıştır.			
	RMSE (Test)	MAE (Test)	MAPE (Test)	MASE (Test)
AUTO. ARIMA	14543.261	11837.327	49.18372	2.5094196
ETS	13579.987	10445.681	45.09873	2.2144015
STL	18861.122	15185.046	62.87592	3.2191094
SES	14569.848	11642.845	49.03143	2.4681910
TBATS	15182.550	12401.016	51.46153	2.6289171
HOLT-WINTERS	16677.582	14188.047	56.8272	3.0077535
THETAF	21651.728	18205.68	71.49376	3.8594604
ELM	17935.804	15637.90	61.42291	3.315112
MLP	12804.773	10518.3131	43.25969	2.2297990
NNAR	11852.193	8911.932	38.88663	1.889259



Şekil 2 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) 12-aylık tahmin grafikleri

Şekil 2’de görüldüğü gibi, koyu gölgeli alan tahmin edilen %80 aralıkları göstermektedir. Diğer bir deyişle, her potansiyel değer için %80 olasılıkla koyu gölgeli alanda olduğu tahmin edilmektedir. Açık gölgeli alan %95 tahmin aralıklarını gösterir. Bu tahmin aralıkları, tahmindeki değişkenliği göstermenin yararlı bir yoludur. Bu durumda tahminin güvenilir olduğu varsayılır ve bu nedenle tahmin aralıkları çok dardır. Mavi çizgi, nokta tahminleri dediğimiz potansiyel gelecek değerlerin ortalamasıdır.

12-aylık tahminler için zaman serisinin ilk 120-aylık kısmı, modellerin eğitimi için geriye kalan son 12-aylık kısım ise model performanslarını değerlendirmek için test amacıyla kullanıldı. Tablo 2’de görüldüğü gibi MAPE metriğini referans aldığımızda en iyi tahmin yapan istatistiksel tabanlı modellerden ETS, SES ve TBATS modelleri sırasıyla %45,098, %49,031 ve %51,461 gibi hata değerleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Aynı modellerin doğruluk tahminleri ise sırasıyla %54,902, %50,969 ve %48,539 dür. MASE metriğinin küçük değeri daha iyi tahmin anlamına geldiği için aynı modellerin MASE değerleri sırasıyla 2,214, 2,468 ve 2,628 dir. Burada hem MAPE ve hem de MASE metrik değerleri arasında bir uygunluk ilişkisinden söz etmek mümkündür.

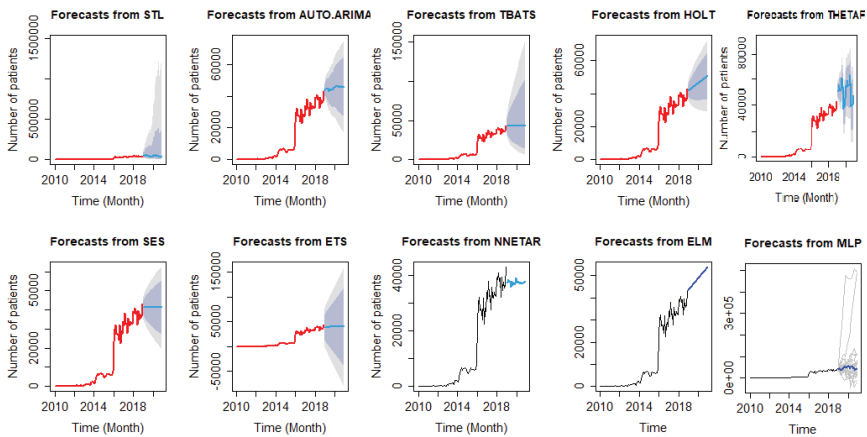
Derin öğrenme metodlarının MAPE metriği NNAR, MLP ve ELM için hata değerleri sırasıyla %38,886, %43,259 ve %61,422 dir. Aynı modellerin MAPE doğruluk yüzdeleri ise sırasıyla %61,114, %56,741 ve %38,578 dir. Aynı modellerin MASE değerleri ise sırasıyla 1,889, 2,229 ve 3,315 dir. Bu durumda derin öğrenme modellerinden olan NNAR %6,212 lik bir değerle en iyi tahmini yapan istatistik tabanlı ETS modelinden %6,212 kadar daha iyi tahmin yapmıştır. Genel anlamda tahmin sonuçlarının düşük çıkmasının nedeni test için kullanılan verinin oldukça kısıtlı olmasına bağlanabilir.

2.2.2 24-aylık tahmin analizleri: Zaman serisinin 108-aylık eğitim/24-aylık test için ayrılması

Tablo 3'te verildiği gibi eğitim test bölümlenmesinde 108 aylık eğitim ve 24 aylık test verisine ayrılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Tahmin grafikleri Şekil 3'te verilmiştir.

Tablo 3 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) model performanslarını karşılaştırmak amacıyla 24-aylık tahmin sonucunda elde edilen RMSE, MAE, MAPE ve MASE hata metrik değerleri

Model Adı	24 aylık tahminler için, veri setinin % 81'i (108 aylık) eğitim % 19'u (24 aylık) test için ayrılmıştır.			
	RMSE (Test)	MAE (Test)	MAPE (Test)	MASE (Test)
AUTO.ARIMA	10313.32	7090.184	27.49869	1.480804
ETS	7655.999	4926.255	19.37900	1.0288618
STL	13168.34	9749.611	35.52262	2.0362331
SES	8007.982	5043.376	20.41317	1.0533230
TBATS	8613.322	5495.769	22.20241	1.1478065
HOLT-WINTERS	11823.133	8287.309	31.2955	1.7308273
THETAF	16822.966	13663.020	46.61802	2.8535592
ELM	13731.488	10349.417	37.40187	2.1615041
MLP	16137.418	12079.5980	43.01581	2.52285721
NNAR	7711.900	4751.014	19.15781	0.9922622



Şekil 3 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) 24-aylık tahmin grafikleri

24-aylık tahminler için zaman serisinin ilk 108-aylık kısmı, modellerin eğitimi için geriye kalan son 24-aylık kısım ise model performanslarını değerlendirmek için test amacıyla kullanıldı. Tablo 3'te görüldüğü gibi MAPE metriğini referans aldığımızda en iyi tahmin yapan istatistiksel tabanlı modellerden ETS, SES ve TBATS modelleri sırasıyla %19,379, %20,413 ve %22,202 gibi hata değerleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Aynı modellerin doğruluk tahminleri ise sırasıyla %80,621, %79,587 ve %77,798 dir. MASE metriğinin küçük değeri daha iyi tahmin anlamına geldiği için aynı modellerin MASE değerleri sırasıyla 1,028, 1,053 ve 1,147 dir. Burada hem MAPE ve hem de MASE metrik değerleri arasında bir uygunluk ilişkisinden söz etmek mümkündür.

Derin öğrenme metotlarının MAPE metriği NNAR, ELM ve MLP için hata değerleri sırasıyla %19,157, %37,401 ve %43,015 dir. Aynı modellerin MAPE doğruluk yüzdeleri ise sırasıyla %80,843, %62,599 ve %56,85 dir. Aynı modellerin MASE değerleri ise sırasıyla 0,992, 2,161 ve 2,522 dir. Bu durumda derin öğrenme modellerinden olan NNAR %0,222 lik bir değerle en iyi tahmini yapan istatistik tabanlı ETS modelinden %0,222 kadar daha iyi tahmin yapmıştır. Her iki gruptaki en iyi tahmin yapan modeller kendi aralarında oldukça yakın tahmin yapmışlardır. Ayrıca test verilerindeki artışın tahmin sonuçlarını da genel anlamda olumlu etkilediğini söylemek mümkündür.

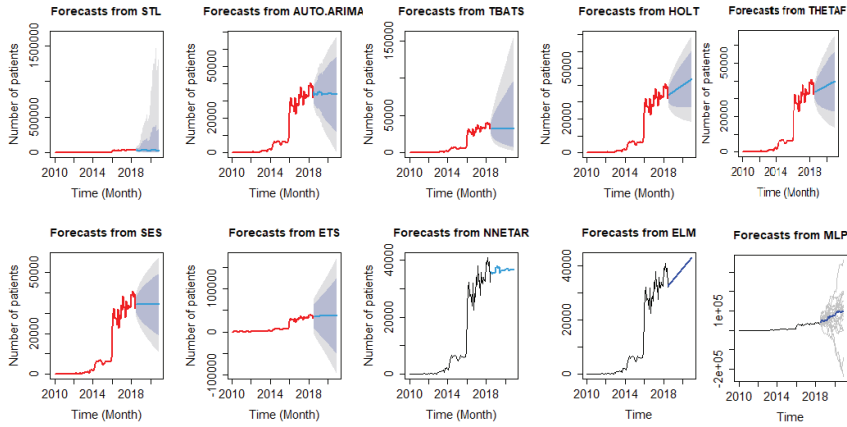
2.2.3 30-aylık tahmin analizleri: Zaman serisinin 102-aylık eğitim/30-aylık test için ayrılması

Tablo 4'da gösterildiği gibi eğitim test bölümlenmesinde 102 aylık eğitim ve 30 aylık test verisine ayrılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Tahmin grafikleri Şekil 4'te verilmiştir.

Tablo 4 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) model performanslarını karşılaştırmak amacıyla 30-aylık tahmin sonucunda elde edilen RMSE, MAE, MAPE ve MASE hata metrik değerleri

Model Adı	30 aylık tahminler için, veri setinin % 77'si (102 aylık) eğitim % 23'ü (30 aylık) test için ayrılmıştır.			
	RMSE (Test)	MAE (Test)	MAPE (Test)	MASE (Test)
AUTO. ARIMA	7855.677	6384.610	19.92843	1.3298900
ETS	7068.801	4705.719	16.33100	0.9801833
STL	11970.207	10395.095	30.32445	2.1652588
SES	7980.378	6537.717	20.23326	1.3617816
TBATS	8923.264	7927.169	23.35809	1.651199

HOLT-WINTERS	7938.785	5647.481	20.1358	1.1763490
THETAF	7569.763	5434.386	18.55221	1.1319620
ELM	8070.876	6066.481	20.94631	1.2636249
MLP	9123.4501	6816.2718	23.46980	1.41980356
NNAR	7248.625	5125.901	17.15960	1.0677057



Şekil 4 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) 30-aylık tahmin grafikleri

30-aylık tahminler için zaman serisinin ilk 102-aylık kısmı, modellerin eğitimi için geriye kalan son 30-aylık kısım ise model performanslarını değerlendirmek için test amacıyla kullanıldı. Tablo 4'te görüldüğü gibi MAPE metriğini referans aldığımızda en iyi tahmin yapan istatistiksel tabanlı modellerden ETS, THETAF ve AUTO. ARIMA modelleri sırasıyla %16,331, %18,552 ve %19,928 gibi hata değerleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Aynı modellerin doğruluk tahminleri ise sırasıyla %83,669, %81,448 ve %80,072 dir. MASE metriğinin küçük değeri daha iyi tahmin anlamına geldiği için aynı modellerin MASE değerleri sırasıyla 0,980, 1,131 ve 1,329 dir. Burada hem MAPE ve hem de MASE metrik değerleri arasında bir uygunluk ilişkisinden söz etmek mümkündür.

Derin öğrenme metodlarının MAPE metriği NNAR, ELM ve MLP için hata değerleri sırasıyla %17,159, %20,946 ve %23,469 dir. Aynı modellerin MAPE doğruluk yüzdeleri ise sırasıyla %82,841, %79,054 ve %76,531 dir. Aynı modellerin MASE değerleri ise sırasıyla 1,067, 1,263 ve 1,419 dir. Bu durumda istatistiksel tabanlı ETS modeli derin öğrenme modellerinden olan NNAR'dan %0,828 lik bir değerle daha iyi tahmin yapmıştır. Her iki gruptaki en iyi tahmin yapan modeller kendi aralarında oldukça

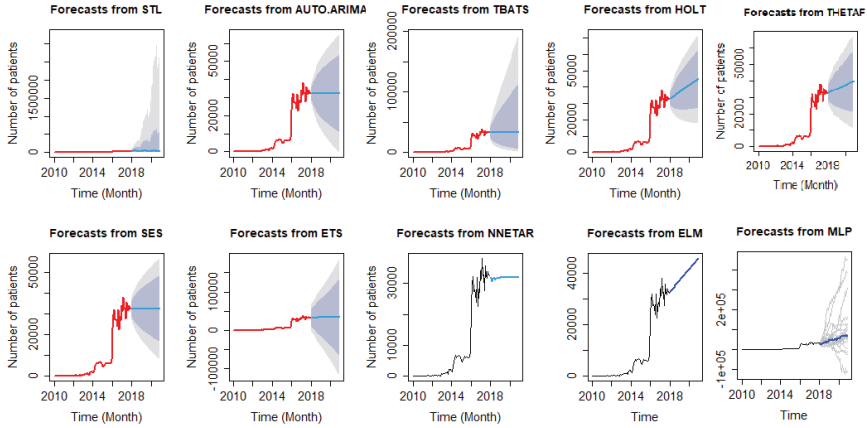
yakın tahmin yapmışlardır. Bu analizde de test verilerindeki artışın tahmin sonuçlarını da genel anlamda olumlu etkilediğini söylemek mümkündür.

2.2.4 36 aylık tahmin analizleri: Zaman serisinin 96 aylık eğitim/36 aylık test için ayrılması

Tablo 5’de gösterildiği gibi eğitim test bölümlenmesinde 96 aylık eğitim ve 36 aylık test verisine ayrılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Tahmin grafikleri Şekil 5’te verilmiştir.

Tablo 5 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) model performanslarını karşılaştırmak amacıyla 36 aylık tahmin sonucunda elde edilen RMSE, MAE, MAPE ve MASE hata metrik değerleri

Model Adı	36 aylık tahminler için, veri setinin % 73’ü eğitim (96 aylık) % 27’si (36 aylık) test için ayrılmıştır.			
	RMSE (Test)	MAE (Test)	MAPE (Test)	MASE (Test)
AUTO. ARIMA	8683.096	7733.419	22.28532	1.6217151
ETS	8043.516	6876.422	8.285898	0.39216
STL	9185.434	6808.318	22.20748	1.4277195
SES	8440.012	7433.648	21.60522	1.5588525
TBATS	8517.387	7530.225	21.82460	1.5791048
HOLT-WINTERS	7735.434	5461.891	19.1333	1.1453707
THETAF	7216.886	5301.825	17.44204	1.1118045
ELM	7988.081	5598.307	19.71282	1.1739775
MLP	22741.3458	14877.1907	50.35276	3.11977995
NNAR	8459.065	7459.764	21.66060	1.5643290



Şekil 5 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) 36-aylık tahmin grafikleri

36-aylık tahminler için zaman serisinin ilk 96-aylık kısmı, modellerin eğitimi için geriye kalan son 36-aylık kısım ise model performanslarını değerlendirmek için test amacıyla kullanıldı. Tablo 5’te görüldüğü gibi MAPE metriğini referans aldığımızda en iyi tahmin yapan istatistiksel tabanlı modellerden ETS, THETAF ve HOLT-WINTERS modelleri sırasıyla %8,285, %17,442 ve %19,133 gibi hata değerleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Aynı modellerin doğruluk tahminleri ise sırasıyla %91,715, %82,558 ve %80,867 dir. MASE metriğinin küçük değeri daha iyi tahmin anlamına geldiği için aynı modellerin MASE değerleri sırasıyla 0,392, 1,111 ve 1,145 dir. Burada hem MAPE ve hem de MASE metrik değerleri arasında bir uygunluk ilişkisinden söz etmek mümkündür.

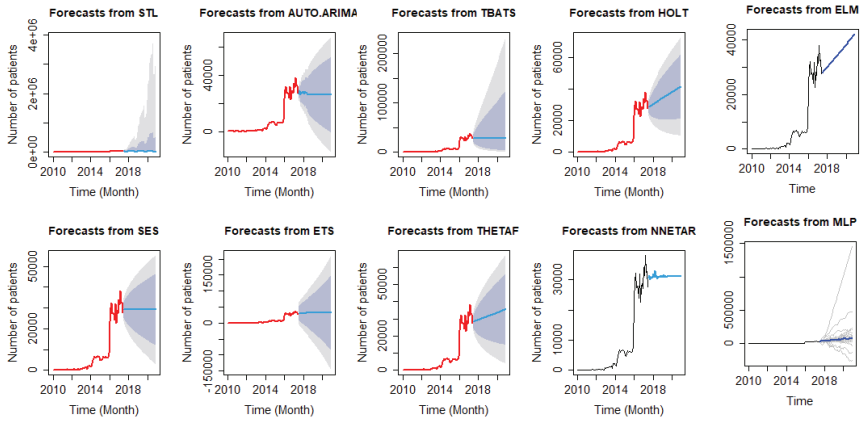
Derin öğrenme metodlarının MAPE metriği ELM, NNAR ve MLP için hata değerleri sırasıyla %19,712 , %21,660, ve %50,352 dir. Aynı modellerin MAPE doğruluk yüzdeleri ise sırasıyla %80,288, %78,34, %79,054 ve %49,648 dir. Aynı modellerin MASE değerleri ise sırasıyla 1,173, 1,564 ve 3,119 dir. Bu durumda istatistiksel tabanlı ETS modeli derin öğrenme modellerinden olan ELM’den %11,427 lik bir değerle daha iyi tahmin yapmıştır. Bu analizde, istatistiksel tabanlı modellerin performansları artarken derin öğrenme tabanlı modellerin performansları düşmüştür.

2.2.5 42-aylık tahmin analizleri: Zaman serisinin 90-aylık eğitim/42-aylık test için ayrılması

Tablo 6’da gösterildiği gibi eğitim test bölümlenmesinde 90 aylık eğitim ve 42 aylık test verisine ayrılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme ve istatistiksel modelleri model karşılaştırmaları başlığı altında ayrı olarak incelenecektir. Tahmin grafikleri Şekil 6’da verilmiştir.

Tablo 6 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) model performanslarını karşılaştırmak amacıyla 42-aylık tahmin sonucunda elde edilen RMSE, MAE, MAPE ve MASE hata metrik değerleri

Model Adı	42 aylık tahminler için, veri setinin % 69'ü eğitim (90 aylık) % 31'si (42 aylık) test için ayrılmıştır.			
	RMSE (Test)	MAE (Test)	MAPE (Test)	MASE (Test)
AUTO.ARIMA	12608.099	11878.598	31.78319	2.5497708
ETS	8553.529	7466.187	21.29665	1.6026358
STL	15041.799	13945.217	37.96597	2.9933757
SES	10392.609	9618.308	26.43452	2.0645940
TBATS	11500.801	10828.44	29.37803	2.3243511
HOLT-WINTERS	7454.82	5833.858	18.73846	1.2522523
THETAF	8481.048	7304.381	21.44906	1.5679036
ELM	7616.605	6040.163	19.39089	1.2965362
MLP	22598.8633	17274.0662	54.08647	2.45230067
NNAR	8794.586	7807.224	22.07086	1.6854425



Şekil 6 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) 42-aylık tahmin grafikleri

42-aylık tahminler için zaman serisinin ilk 90-aylık kısmı, modellerin eğitimi için geriye kalan son 42-aylık kısım ise model performanslarını değerlendirmek için test amacıyla kullanıldı. Tablo 6'da görüldüğü gibi MAPE metriğini referans aldığımızda en iyi tahmin yapan istatistiksel tabanlı modellerden HOLT-WINTERS, ELM ve THETAF modelleri sırasıyla %18,738, %21,296 ve %21,449 gibi hata değerleri ile ön plana çık-

maktadırlar. Aynı modellerin doğruluk tahminleri ise sırasıyla %81,262, %78,704 ve %78,551 dir. MASE metriğinin küçük değeri daha iyi tahmin anlamına geldiği için aynı modellerin MASE değerleri sırasıyla 1,252, 1,602 ve 1,567 dir. Burada hem MAPE ve hem de MASE metrik değerleri arasında bir uygunluk ilişkisinden söz etmek mümkündür.

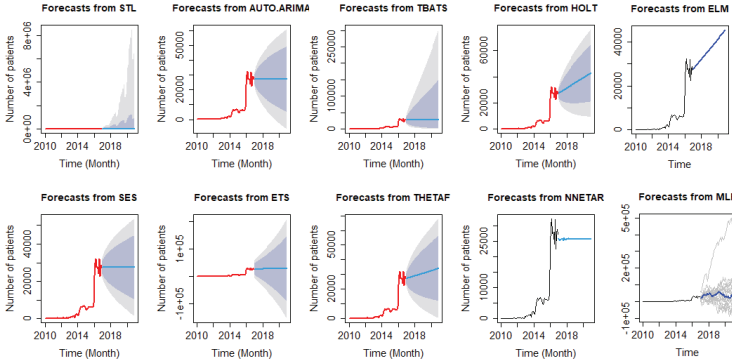
Derin öğrenme metotlarının MAPE metriği ELM, NNAR ve MLP için hata değerleri sırasıyla %19,390, %22,070 ve %54,086 dir. Aynı modellerin MAPE doğruluk yüzdeleri ise sırasıyla %80,61, %77,93 ve %45,914 dir. Aynı modellerin MASE değerleri ise sırasıyla 1,296, 1,685 ve 2,452 dir. Bu durumda istatistik tabanlı öğrenme modellerinden olan HOLT-WINTERS %0,652 lik bir değerle en iyi tahmini yapan derin öğrenme modeli ELM modelinden %0,652 kadar daha iyi tahmin yapmıştır. Genel anlamda tahmin sonuçlarının düşük çıkmasının nedeni test için kullanılan verinin oldukça kısıtlı olmasına bağlanabilir.

2.2.6 48-aylık tahmin analizleri: Zaman serisinin 84-aylık eğitim/48-aylık test için ayrılması

Tablo 7’de gösterildiği gibi eğitim test bölümlenmesinde 84 aylık eğitim ve 48 aylık test verisine ayrılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme ve istatistiksel modelleri model karşılaştırmaları başlığı altında ayrı olarak incelenecektir. Tahmin grafikleri Şekil 7’de verilmiştir.

Tablo 7 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) model performanslarını karşılaştırmak amacıyla 48-aylık tahmin sonucunda elde edilen RMSE, MAE, MAPE ve MASE hata metrik değerleri

Model Adı	48 aylık tahminler için, veri setinin % 64’ü eğitim (84 aylık) % 36’si (48 aylık) test için ayrılmıştır.			
	RMSE (Test)	MAE (Test)	MAPE (Test)	MASE (Test)
AUTO. ARIMA	11492.518	10681.75	28.98438	2.3001941
ETS	10787.49	9976.930	27.32205	2.148419
STL	10355.682	8062.330	24.03344	1.7361316
SES	11220.777	10387.7086	28.24317	2.2368756
TBATS	11490.306	10679.3666	28.97837	2.2996809
HOLT-WINTERS	7054.640	5356.483	17.47589	1.1534581
THETAF	8641.998	7628.3891	21.99629	1.6426874
ELM	7249.148	5201.051	17.53616	1.1199875
MLP	10084.1248	8263.2906	23.60782	1.7794062
NNAR	12715.144	11984.9388	32.28306	2.580821



Şekil 7 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) 48-aylık tahmin grafikleri

48-aylık tahminler için zaman serisinin ilk 84-aylık kısmı, modellerin eğitimi için geriye kalan son 48-aylık kısım ise model performanslarını değerlendirmek için test amacıyla kullanıldı. Tablo 7’de görüldüğü gibi MAPE metriğini referans aldığımızda en iyi tahmin yapan istatistiksel tabanlı modellerden HOLT-WINTERS, THETAF ve STL modelleri sırasıyla %17,475, %21,996 ve %24,033 gibi hata değerleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Aynı modellerin doğruluk tahminleri ise sırasıyla %82,525, %78,004 ve %75,967 dir. MASE metriğinin küçük değeri daha iyi tahmin anlamına geldiği için aynı modellerin MASE değerleri sırasıyla 1,153, 1,642 ve 1,736 dir. Burada hem MAPE ve hem de MASE metrik değerleri arasında bir uygunluk ilişkisinden söz etmek mümkündür.

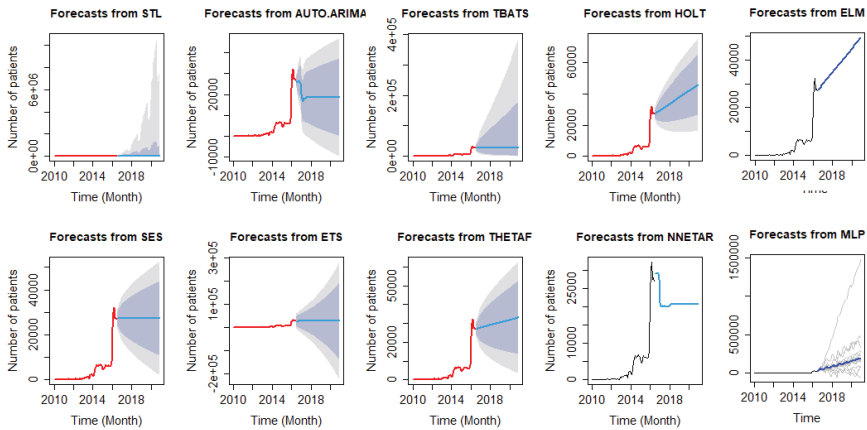
Derin öğrenme metodlarının MAPE metriği ELM, MLP ve NNAR için hata değerleri sırasıyla %17,536, %23,607 ve %32,283 dir. Aynı modellerin MAPE doğruluk yüzdeleri ise sırasıyla %82,464, %76,393 ve %67,717 dir. Aynı modellerin MASE değerleri ise sırasıyla 1,119, 1,779 ve 2,580 dir. Bu durumda istatistik tabanlı öğrenme modellerinden olan HOLT-WINTERS %0,061 lik bir değerle en iyi tahmini yapan derin öğrenme modeli ELM modelinden %0,061 kadar daha iyi tahmin yapmıştır. Genel anlamda tahmin sonuçlarının düşük çıkmasının nedeni test için kullanılan verinin oldukça kısıtlı olmasına bağlanabilir.

2.2.7 54-aylık tahmin analizleri: Zaman serisinin 78-aylık eğitim/54-aylık test için ayrılması

Tablo 8’ de gösterildiği gibi eğitim test bölümlenmesinde 78 aylık eğitim ve 54 aylık test verisine ayrılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme ve istatistiksel modelleri model karşılaştırmaları başlığı altında ayrı olarak incelenecektir. Tahmin grafikleri Şekil 8’de verilmiştir.

Tablo 8 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) model performanslarını karşılaştırmak amacıyla 54-aylık tahmin sonucunda elde edilen RMSE, MAE, MAPE ve MASE hata metrik değerleri

Model Adı	54 aylık tahminler için, veri setinin % 60'ü eğitim (78 aylık) % 40'si (54 aylık) test için ayrılmıştır.			
	RMSE (Test)	MAE (Test)	MAPE (Test)	MASE (Test)
AUTO. ARIMA	18234.475	16809.1115	44.61080	5.261193
ETS	10672.088	9617.435	26.52015	3.010223
STL	14974.224	13472.7595	37.20791	4.216926
SES	10814.021	9695.3224	26.62030	3.0346017
TBATS	11073.637	9968.4071	27.30658	3.1200762
HOLT-WINTERS	6708.412	4481.3384	15.69018	15.69018
THETAF	8381.143	7263.8461	20.99569	2.2735582
ELM	7561.714	4760.9519	17.04753	1.4901611
MLP	86793.5739	75367.86899	218.9294	23.5898767
NNAR	16477.73	15178.6571	40.59152	4.7508660



Şekil 8 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) 54-aylık tahmin grafikleri

54-aylık tahminler için zaman serisinin ilk 78-aylık kısmı, modellerin eğitimi için geriye kalan son 54-aylık kısım ise model performanslarını değerlendirmek için test amacıyla kullanıldı. Tablo 8'de görüldüğü gibi MAPE metriğini referans aldığımızda en iyi tahmin yapan istatistiksel tabanlı modellerden HOLT-WINTERS, THETAF ve ETS modelleri sırasıyla %15,690, %20,995 ve %26,520 gibi hata değerleri ile ön plana çıkmakta-

dırlar. Aynı modellerin doğruluk tahminleri ise sırasıyla %84,31, %79,005 ve %73,48 dir. MASE metriğinin küçük değeri daha iyi tahmin anlamına geldiği için aynı modellerin MASE değerleri sırasıyla 1,569, 2,273 ve 3,01 dir. Burada hem MAPE ve hem de MASE metrik değerleri arasında bir uygunluk ilişkisinden söz etmek mümkündür.

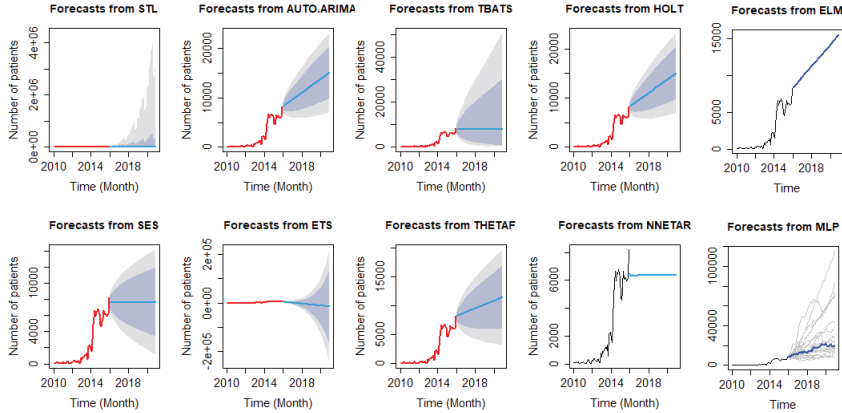
Derin öğrenme metotlarının MAPE metriği ELM, MLP ve NNAR için hata değerleri sırasıyla %17,047, %21,892 ve %40,591 dir. Aynı modellerin MAPE doğruluk yüzdeleri ise sırasıyla %82,953, %78,108 ve %59,409 dir. Aynı modellerin MASE değerleri ise sırasıyla 1,490, 2,358 ve 4,750 dir. Bu durumda istatistik tabanlı öğrenme modellerinden olan HOLT-WINTERS %1,357 lik bir değerle en iyi tahmini yapan derin öğrenme modeli ELM modelinden %1,357 kadar daha iyi tahmin yapmıştır. Genel anlamda tahmin sonuçlarının düşük çıkmasının nedeni test için kullanılan verinin oldukça kısıtlı olmasına bağlanabilir.

2.2.8 60-aylık tahmin analizleri: Zaman serisinin 72-aylık eğitim/60-aylık test için ayrılması

Tablo 9’da görüldüğü gibi eğitim test bölümlenmesinde 72 aylık eğitim ve 60 aylık test verisine ayrılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme ve istatistiksel modelleri model karşılaştırmaları başlığı altında ayrı olarak incelenecektir. Tahmin grafikleri Şekil 9’da verilmiştir.

Tablo 9 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) model performanslarını karşılaştırmak amacıyla 60-aylık tahmin sonucunda elde edilen RMSE, MAE, MAPE ve MASE hata metrik değerleri

Model Adı	60 aylık tahminler için, veri setinin % 55’ü eğitim (72 aylık) % 45’si (60 aylık) test için ayrılmıştır.			
	RMSE (Test)	MAE (Test)	MAPE (Test)	MASE (Test)
AUTO. ARIMA	24093.9724	23338.2939	65.43491	18.3445906
ETS	41278.540	39845.4624	113.12230	31.3197142
STL	27894.4317	27008.0748	75.85602	21.2291472
SES	28193.2032	27381.8627	77.095717	21.5229555
TBATS	27850.9560	27029.3443	76.03891	21.2458656
HOLT-WINTERS	24101.863	23346.1873	65.45756	18.35080
THETAF	25940.7756	25163.8469	70.66626	19.77952184
ELM	23855.475	23099.4879	64.75059	18.1568820
MLP	20307.3009	19730.6508	55.93070	15.5091356
NNAR	29454.8155	28678.4742	80.98021	22.5421305



Şekil 9 İstatistiksel tabanlı (7-model) ve derin öğrenme tabanlı (3-model) 60-aylık tahmin grafikleri

60-aylık tahminler için zaman serisinin ilk 72-aylık kısmı, modellerin eğitimi için geriye kalan son 60-aylık kısım ise model performanslarını değerlendirmek için test amacıyla kullanıldı. Tablo 9’da görüldüğü gibi MAPE metriğini referans aldığımızda en iyi tahmin yapan istatistiksel tabanlı modellerden AUTO-ARIMA, HOLT-WINTERS ve THETAF modelleri sırasıyla %65,434 %65,457 ve %70,666 gibi hata değerleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Aynı modellerin doğruluk tahminleri ise sırasıyla %34,566, %34,543 ve %29,334 dür. MASE metriğinin küçük değeri daha iyi tahmin anlamına geldiği için aynı modellerin MASE değerleri sırasıyla 18,344, 18,350 ve 19,779 dir. Burada hem MAPE ve hem de MASE metrik değerleri arasında bir uygunluk ilişkisinden söz etmek mümkündür.

Derin öğrenme metodlarının MAPE metriği MLP, ELM ve NNAR için hata değerleri sırasıyla %55,930, %64,750 ve %80,980 dir. Aynı modellerin MAPE doğruluk yüzdeleri ise sırasıyla %44,07, %35,25 ve %19,02 dir. Aynı modellerin MASE değerleri ise sırasıyla 15,509, 18,156 ve 22,542 dir. Bu durumda derin öğrenme modellerinden olan MLP %9,504 lik bir değerle en iyi tahmini yapan istatistik tabanlı AUTO-ARIMA modelinden %9,504 kadar daha iyi tahmin yapmıştır. Genel anlamda tahmin sonuçlarının düşük çıkmasının nedeni test için kullanılan verinin oldukça kısıtlı olmasına bağlanabilir.

2.3 Zaman Serileri için Çapraz-Doğrulama

Model performansını daha sağlıklı değerlendirmek için makine öğrenmede çapraz doğrulama yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde verisetin

bir kısmı eğitim ve diğer bir kısmı sabit uzunluklu test olmak üzere ikiye ayrılır. Her defasında test verisi k adım kadar ilerleterek geriye kalan kısım eğitim olarak kullanılır. Böylece verinin tamamı hem test hem de eğitim için kullanılma imkânı sağlanır. Nihai olarak elde k adedince bölünen eğitim/test verilerine bağlı olarak yapılan tahminlerin ortalaması alınır.

Ancak bu rastgele yöntem zaman serileri için uygun değildir. Zaman serileri için başta eğitim verisi hemen ardından test verisi olmak kaydıyla geçmiş ve gelecek arasındaki ilişkiye zarar vermeden bu işlem gerçekleştirilir ve elde edilen tahminlerin ortalaması alınır.

Şekil 10'da verildiği gibi veriseti 132 aylıktan oluşmakta ve başlangıçta test/eğitim oranı 1/3 oranında tutulmuştur. K değeri 8 alınmış ve çalışmada kullanılan 10 model için zaman serilerine uygun olarak bir çapraz doğrulama metodu uygulanmıştır. Tahmin için kullanılan test verisini uzunluğu sabit bir şekilde 12-aylık olarak tutulmuştur. Her k değeri için eğitim verisini uzunluğu 12 ay artırılmıştır. Başlangıçta 36-aylık olan eğitim verisi sırasıyla 48, 60, 72, 84, 96, 108 ve 120-aylık olacak şekilde değiştirilmiş ve her model için 8 tane MAPE metrik değeri elde edilmiştir. MAPE metrik değerlerinin model bazındaki ortalamaları ve modellerin tahmin sıralamaları Tablo 12 te verilmiştir.

K/aylar	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
1	Eğitim			Test							
2	Eğitim				Test						
3	Eğitim					Test					
4	Eğitim						Test				
5	Eğitim							Test			
6	Eğitim								Test		
7	Eğitim									Test	
8	Eğitim										Test

Şekil 1 Test verisi sabit olarak uygulanan Zaman serilerinde Çapraz-Doğrulama

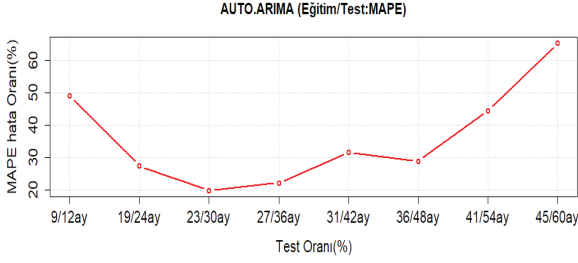
Tablo 1 12-aylık MAPE tahmin ortalaması

Model adı	MAPE için 12-aylık tahmin ortalaması (%)
ELM	32,59292
AUTO. ARIMA	32,98738
HOLT-WINTERS	33,57381
SES	36,37076
NNAR	38,03891
THETAF	40,51806
ETS	45,66436
MLP	47,20681
TBATS	66,38141
STL	73,13581

Tablo 10'da görüldüğü gibi zaman serilerine uygun olarak $k=9$ için gerçekleştirilen çapraz-doğrulama neticesinde en iyi başarımlar sırası ELM, AUTO. ARIMA, HOLT-WINTERS, SES ve NNAR olarak elde edilmiştir. ELM ve AUTO. ARIMA modellerinin performansları oldukça yakın olduğu gözlenmektedir. MAPE metriği % olarak modelin yaptığı hatayı ifade ettiğinden dolayı ELM ve AUTO. ARIMA modellerinin tahmin performansları ise sırasıyla %67,41 ve %67,01 olmaktadır.

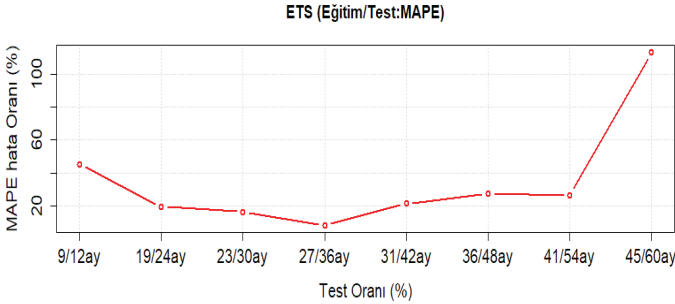
2.4 MAPE Hata Metriğine Göre Hata Değerlerinin Grafikselsel İncelenmesi

Tez kapsamında uygulanan 10 adet tahmin algoritması ve 8 adet tahmin analizi sonucunda eğitim/test oranına bakılarak algoritma bazlı en iyi tahmin yaptığı eğitim/test oranı saptanmıştır. Kullanılan veri setine bağlı olarak tahmin sürecindeki her bir model için bu oran değişkenlik göstermiştir. Ancak her bir model için eğitim/test oranı kesin olarak ortaya konulmuştur.



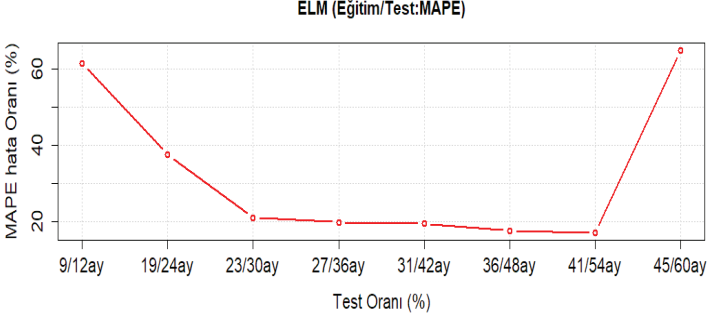
Şekil 2 Zaman serilerinde AUTO.ARIMA algoritması için uygulanan 8 tahmin analizi

AUTO.ARIMA modeli için Şekil 11'e bakıldığında en iyi tahmin eğitim/test oranı %23 ile 102/30 ay olduğu görülmüştür.



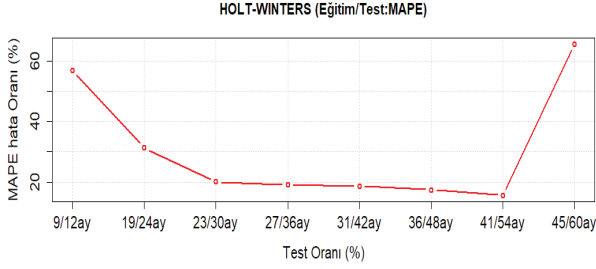
Şekil 3 Zaman serilerinde ETS algoritması için uygulanan 8 tahmin analizi

ETS modeli için Şekil 12'ye bakıldığında en iyi tahmin eğitim/test oranı %27 ile 96/36 ay olduğu görülmüştür.



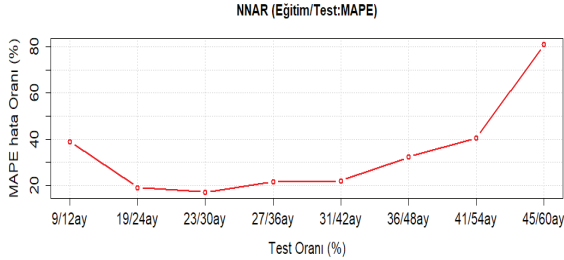
Şekil 4 Zaman serilerinde ELM algoritması için uygulanan 8 tahmin analizi

ELM modeli için Şekil 13'e bakıldığında en iyi tahmin eğitim/test oranı %41 ile 78/54 ay olduğu görülmüştür.



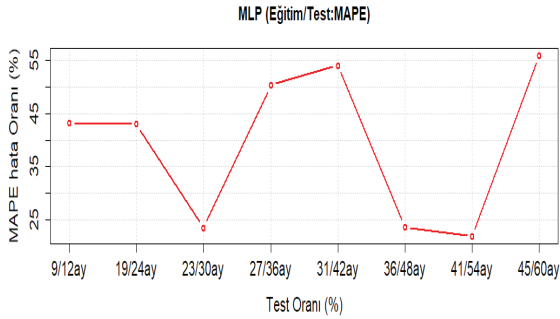
Şekil 14 Zaman serilerinde HOLT-WINTERS algoritması için uygulanan 8 tahmin analizi

HOLT-WINTERS modeli için Şekil 14'e bakıldığında en iyi tahmin eğitim/test oranı %41 ile 78/54 ay olduğu görülmüştür.



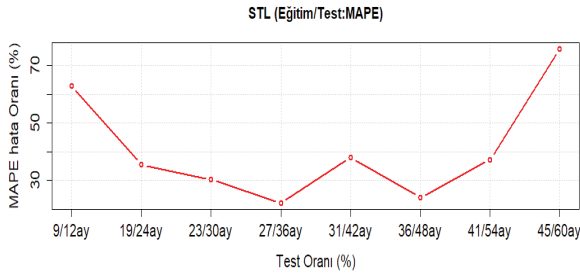
Şekil 15 Zaman serilerinde NNAR algoritması için uygulanan 8 tahmin analizi

NNAR modeli için Şekil 15'e bakıldığında en iyi tahmin eğitim/test oranı %23 ile 102/30 ay olduğu görülmüştür.



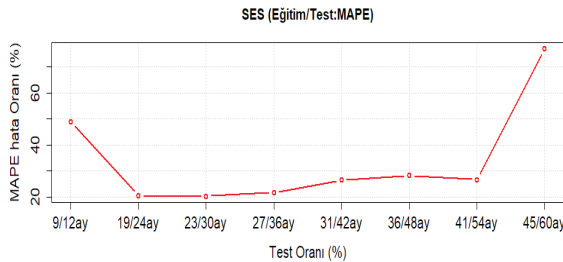
Şekil 16 Zaman serilerinde MLP algoritması için uygulanan 8 tahmin analizi

MLP modeli için Şekil 16'ya bakıldığında en iyi tahmin eğitim/test oranı %41 ile 78/54 ay olduğu görülmüştür.



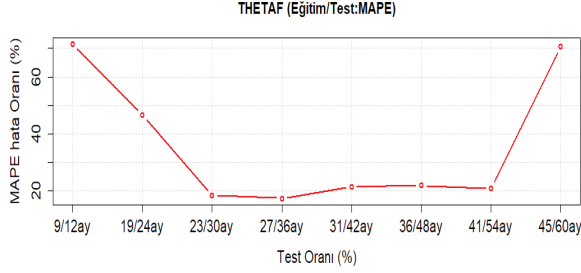
Şekil 17 Zaman serilerinde STL algoritması için uygulanan 8 tahmin analizi

STL modeli için Şekil 17'ye bakıldığında en iyi tahmin eğitim/test oranı %27 ile 96/36 ay olduğu görülmüştür.



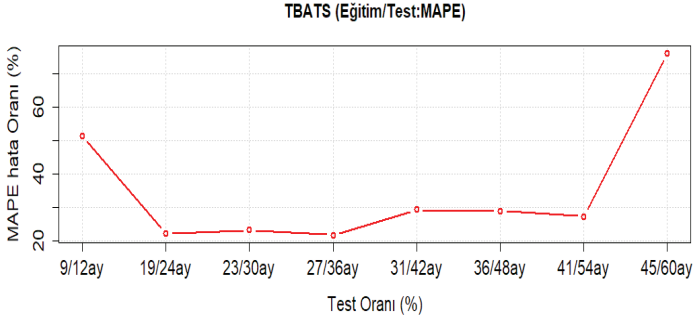
Şekil 18 Zaman serilerinde SES algoritması için uygulanan 8 tahmin analizi

SES modeli için Şekil 18'e bakıldığında en iyi tahmin eğitim/test oranını %23 ile 102/30 ay olduğu görülmüştür.



Şekil 19 Zaman serilerinde THETAF algoritması için uygulanan 8 tahmin analizi

THETAF modeli için Şekil 19'a bakıldığında en iyi tahmin eğitim/test oranını %27 ile 96/36 ay olduğu görülmüştür.



Şekil 20 Zaman serilerinde TBATS algoritması için uygulanan 8 tahmin analizi

TBATS modeli için Şekil 20'ye bakıldığında en iyi tahmin eğitim/test oranını %27 ile 96/36 ay olduğu görülmüştür.

3. SONUÇLAR

Tez kapsamında yapılan 8 adet tahmin analizin model bazında tahmin ortalamaları hesaplanmıştır.

MAPE metriğine göre ortalamalar dikkate alındığında ilk beşte yer alan model performansları HOLT-WINTERS, ELM, SES, NNAR ve ETS olarak sıralanmaktadır. İstatistik tabanlı 7 adet modelin MAPE metriğine göre hata ortalamaları %35,308 iken derin öğrenme tabanlı modellerin hata ortalamaları ise %35,275 tir. Mevcut veriseti üzerinde her iki gruptaki

modellerin hataları birbirlerine yakın olmakla birlikte genel anlamda derin öğrenme modellerin daha iyi tahmin yaptığını söylemek mümkündür.

Herhangi bir araştırma niteliği kabul edilen metodolojinin kapsamı ile belirlenir. Bu bölümde hastane servislerine gelen ve radyolojik görüntü istenen hasta sayılarının analizleri yapılmıştır. Geçmişte Muş Devlet Hastanesinde bilgi işlem personeli olarak çalışmam ve bulunduğumuz ildeki tek devlet hastanesi olması hastane seçimimizi etkilemiştir.

Çalışmalarımızda kullanılan veriler kişisel verileri barındırmadığı için etik kurul kararı alınmamıştır. Hastane bilgi işleminden 2010-2020 yılları arasından 132 aylık eğitim/test verisi alınmıştır. Alınan eğitim/test verileri incelendiğinde ilk yıllardaki verilerin tutarsızlığı açıkça fark edilmiştir. Bu eksiklik iki nedene bağlanmıştır. Birincisi dönemin mevcut cihaz sayıları ile yıllar arasındaki cihaz sayılarının eşit olmaması, ikincisi ise hastane bilgi yönetim sistemlerinin ve personellerin belirli aralıklar ile ihale edilerek el değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Hastaneden alınan ve Tablo 3’de gösterilen verilerdeki eksiklik nedeni tam olarak bilinmediğinden göz ardı edilmiş ve orijinal veri seti üzerinde bir düzeltme işlemi yapılmadan analizler gerçekleştirilmiştir. Çünkü cihaz yetersizliği, bakımından kaynaklı görüntüleme sayılarındaki tutarsızlık gerçekleşmiş ise orijinal verilere müdahale etmemiz çalışmalarımızın seyrini değiştireceğinden orijinal veriler kullanılmıştır.

Muş devlet hastanesinden almış olduğumuz 132 aylık verimizi 8 ayrı eğitim/test verisi olarak ayrıştırılıp analiz edilmiştir. 120/12, 108/24, 102/30, 96/36, 90/42, 84/48, 78/54 ve 72/60 aylık olarak böldüğümüz verileri belirlemiş olduğumuz istatistiksel ve derin öğrenme modelleri ile eğitilmiş ve çıkan sonuçlar test verileri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda kullanılan hata metriklerinde MAPE ve RMSE metrikleri dikkate alınmıştır.

Verilerin analizi sonucu istatistiksel tahmin modellerinden Holt-Winters yöntemi, derin öğrenme modellerinden ise ELM yöntemi en iyi tahmin yapan yöntemler olmuştur. En iyi tahmin yapan bu iki model karşılaştırıldığında 102/30 aylık eğitim/test analiz süreci dışında Holt-Winters yöntemi ELM yönteminden daha başarılı olduğu görülmüştür. 102/30 aylık eğitim/test analiz sürecinde ise ELM yöntemi Holt-Winters yöntemine göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Orijinal verilerdeki eksiklik ve son yıllardaki pandemi süreci analizimizde bir kısıtlılığa neden olmuştur. Genel anlamda tahmin sürecinde en iyi sonuçların Holt-Winters modeli tarafından yapıldığı söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Ak, R., Fink, O., & Zio, E. (2016). Two Machine Learning Approaches for Short-Term Wind Speed Time-Series Prediction. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 27(8), 1734–1747. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2015.2418739>
- Alfaras, M., Soriano, M. C., & Ortín, S. (2019). A Fast Machine Learning Model for ECG-Based Heartbeat Classification and Arrhythmia Detection. *Frontiers in Physics*, 7(July), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00103>
- Atıcı, R., & Pala, Z. (2021). Prediction of the Ionospheric foF2 Parameter Using R Language Forecast Hybrid Model Library Convenient Time. *Wireless Personal Communications*, (doi.org/10.1007/s11277-021-09050-6 Prediction), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-09050-6>
- Calegari, R., Fogliatto, F. S., Lucini, F. R., Neyeloff, J., Kuchenbecker, R. S., & Schaan, B. D. (2016). Forecasting Daily Volume and Acuity of Patients in the Emergency Department. <https://doi.org/10.1155/2016/3863268>
- Gidon, D., Pei, X., Bonzanini, A. D., Graves, D. B., & Mesbah, A. (2019). Machine Learning for Real-time Diagnostics of Cold Atmospheric Plasma Sources, (April). <https://doi.org/10.1109/TRPMS.2019.2910220>
- Golmohammadi, D. (2016). Predicting hospital admissions to reduce emergency department boarding. *International Journal of Production Economics*, 182, 535–544. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.09.020>
- Gopakumar, S., Tran, T., Luo, W., Phung, D., & Venkatesh, S. (2016). Forecasting Daily Patient Outflow From a Ward Having No Real-Time Clinical Data. *JMIR Medical Informatics*, 4(3), e25. <https://doi.org/10.2196/medinform.5650>
- Harrou, F., Dairi, A., Kadri, F., & Sun, Y. (2020). Forecasting emergency department overcrowding: A deep learning framework. *Chaos, Solitons and Fractals*, 139, 110247. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110247>
- Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679–688. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>
- Jiang, F., Jiang, Y., Zhi, H., Dong, Y., Li, H., Ma, S., ... Wang, Y. (2017). Artificial intelligence in healthcare: Past, present and future. *Stroke and Vascular Neurology*, 2(4), 230–243. <https://doi.org/10.1136/svn-2017-000101>
- Jiang, S., Chin, K. S., & Tsui, K. L. (2018). A universal deep learning approach for modeling the flow of patients under different severities. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 154, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.11.003>
- Jones, S. S., Thomas, A., Evans, R. S., Welch, S. J., Haug, P. J., & Snow, G. L. (2019). Forecasting daily patient volumes in the emergency department.

Academic Emergency Medicine, 15(2), 159–170. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2007.00032.x>

- Kalantari, M. (2021). Forecasting COVID-19 pandemic using optimal singular spectrum analysis. *Chaos, Solitons and Fractals*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110547>
- Kim, S., & Kim, H. (2016). A new metric of absolute percentage error for intermittent demand forecasts. *International Journal of Forecasting*, 32(3), 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.12.003>
- Koehler, A. B., Snyder, R. D., & Ord, J. K. (2001). Forecasting models and prediction intervals for the multiplicative Holt-Winters method. *International Journal of Forecasting*, 17(2), 269–286. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(01\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(01)00081-4)
- Kulkarni, S., Seneviratne, N., Baig, M. S., & Khan, A. H. A. (2020, January 1). Artificial Intelligence in Medicine: Where Are We Now? *Academic Radiology*. Elsevier USA. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.10.001>
- Özgüner, E., Tör, O. B., & Güven, A. N. (2017). Probabilistic day-ahead system marginal price forecasting with ANN for the Turkish electricity market. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25(6), 4923–4935. <https://doi.org/10.3906/elk-1612-206>
- Pala, Z., Ünlük, İ. H., & Yıldız, E. (2019). Forecasting of electromagnetic radiation time series: An empirical comparative approach. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 34(8).
- Pala, Z., Yamli, V., & Ünlük, I. H. (2017). Deep Learning researches in Turkey: An academic approach. In *2017 13th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2017 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2017.7937546>
- Pala, Z. (2019a). Using Decomposition-based Approaches to Time Series Forecasting in R Environment. *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics - 2019 (DMS-2019)*, 1(1), 231–233.
- Pala, Z. (2019b). Using forecastHybrid Package to Ensemble Forecast Functions in the R. *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics - 2019 (DMS-2019)*, 1(1), 45–47.
- Pala, Zeydin. (2021). Examining EMF Time Series Using Prediction Algorithms With R, 44(2), 223–227.
- Pala, Zeydin, & Atici, R. (2019). Forecasting Sunspot Time Series Using Deep Learning Methods. *Solar Physics*, 294(5). <https://doi.org/10.1007/s11207-019-1434-6>
- Pala, Zeydin, & Özkan, O. (2020). Artificial Intelligence Helps Protect Smart Homes against Thieves. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 11(3), 945–952. <https://doi.org/10.24012/dumf.700311>

- Pala, Zeydin, & Pala, A. F. (2020). Perform Time-series Predictions in the R Development Environment by Combining Statistical-based Models with a Decomposition-based Approach. *Journal of Muş Alparslan University Faculty of Engineering and Architecture, 1*(1), 1–13.
- Pala, Zeydin, & Şana, M. (2020). Attackdet: Combining web data parsing and real-time analysis with machine learning. *Journal of Advances in Technology and Engineering Research, 6*(1), 37–45. <https://doi.org/10.20474/jater-6.1.4>
- Sena, D., & Nagwani, N. K. (2016). A neural network auto regression model to forecast per capita disposable income. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences, 11*(22), 13123–13128.
- Shahid, K., Manzoor, T., Ibrahim, M., Ahmed, T., & Fiaz, M. (2016). Forecasting of monthly patient volume at radiology department coming for ultrasound: a time series approach. *Journal of University Medical & Dental College, JUMDC, 7*(3), 22–27.
- Siami-Namini, S., Tavakoli, N., & Siami Namin, A. (2019). A Comparison of ARIMA and LSTM in Forecasting Time Series. *Proceedings - 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA 2018*, 1394–1401. <https://doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00227>
- Sorkun, M. r a t C. i h a n. (2018). Time Series Forecasting on Solar Radiation using Deep Learning, *16*.
- Ünlük, İ. H., & Pala, Z. (2019). Prediction of monthly electricity consumption used in Mu ş Alparslan University Complex by means of Classical and Deep Learning methods. *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics - 2019 (DMS-2019), 1*(1), 237–239.
- van Assen, M., Muscogiuri, G., Caruso, D., Lee, S. J., Laghi, A., & De Cecco, C. N. (2020). Artificial intelligence in cardiac radiology. *Radiologia Medica, 1*, 3. <https://doi.org/10.1007/s11547-020-01277-w>
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research, 30*(1), 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Xu, Q., Tsui, K. L., Jiang, W., & Guo, H. (2016). A Hybrid Approach for Forecasting Patient Visits in Emergency Department. In *Quality and Reliability Engineering International* (Vol. 32, pp. 2751–2759). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/qre.2095>
- Yaldız, E., & Pala, Z. (2019). Time Series Analysis of Radiological Data of Outpatients and Inpatients in Emergency Department of Mus State Hospital. *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics - 2019 (DMS-2019)*, 234–236.

Zhang, Y., Luo, L., Zhang, F., Kong, R., Yang, J., Feng, Y., & Guo, H. (2020). Emergency patient flow forecasting in the radiology department. *Health Informatics Journal*. <https://doi.org/10.1177/1460458220901889>

Wolpert, D. and Macready, W. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1):67-82.

Bölüm 16

**MANYETİK SIVI HİPERTERMİDE SABİT
MIKNATIS DİZİLERİNİN KULLANIMI**

Serhat KÜÇÜKDERMENÇİ¹

¹ Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
kucukdermenci@balikesir.edu.tr

1. GİRİŞ

Manyetik akışkan hipertermi (MFH), manyetik nano parçacıkların (MNP) enerji kaybı yoluyla ısı dönüşümünü kullanan bir kanser tedavi stratejisidir (Tay et al., 2018), (Murase et al., 2015). Bu işlem doku sıcaklığını lokal olarak yükseltir. Klinik uygulamalarda 40 °C - 45 °C aralığındaki sıcaklık kanser hücrelerine zarar verir (Roesch & Mueller-Huebenthal, 2015). Uygulanan alternatif manyetik alan (AMF) girdap akımlarını, histerezis kayıplarını veya Brownian ve Neel gibi gevşemeleri tetikleyerek manyetik malzemede ısıtma etkileri gösterebilir (Deatsch & Evans, 2014). Bununla birlikte, MNP boyutunun manyetik özellikler ve dolayısıyla ısıtma mekanizmaları üzerindeki etkisi güçlüdür. Girdap akımı, santimetre veya daha büyük olan malzemelerde baskındır. Histerezis kayıpları ile ısı üretimi, manyetik momentlerin yöneliminin sürekli olarak manyetik alanın yönü ile hizalanma eğiliminde olduğu çoklu manyetik domainlere sahip MNP'lerde meydana gelebilir (Chang et al., 2018). MNP çapı azalınca manyetik yapı çok domainliden tek domainli yapılara dönüşür. Genel olarak, Brownian ve Neel gevşemelerinin tek domainli süperparamanyetik MNP'ler için ısıtma etkilerini ortaya çıkaran baskın mekanizma olduğu düşünülür. Burada Neel zamanı ($\tau_{Néelian}$) sabiti, dahili manyetik momentin harici manyetik alanla hizalanma süresini belirtir. Brown zamanı ($\tau_{Brownian}$) sabiti, tüm parçacığın dönme süresini tanımlar. Etkin gevşeme süresi τ bu iki gevşeme sabitinin ortak etkisidir. Neel ve Brownian gevşemeleri Eşitlik 1'de verilen süreler ile karakterize edilir.

$$\tau_B = \frac{3\eta V_h}{k_B T}, \tau_N = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \tau_0 \frac{\exp \Gamma}{\Gamma^{3/2}}, \Gamma = \frac{k V_m}{k_B T} \quad (1)$$

burada τ_B , τ_N ve τ_0 sırasıyla Brownian gevşeme süresi, Neel gevşeme süresi ve zaman sabitidir. η , k_B , T ve V_h sırasıyla akışkanın viskozitesi, Boltzmann sabiti, mutlak sıcaklık ve MNP'nin hidrodinamik hacmidir. k ve V_m , sırasıyla anizotropi sabiti ve MNP'nin geometrik hacmidir.

MNP'lerin manyetizasyonu gevşeme sabiti süresince uygulanan AMF ile değişir. Gevşeme süresi (τ) Eşitlik 2'deki gibi verilir:

$$\tau^{-1} = \tau_{Brownian}^{-1} + \tau_{Néelian}^{-1} \quad (2)$$

MNP'lerde ısı gücü kaybını tanımlayan Rosensweig denklemi Eşitlik 3 ile ifade edilir (Rosensweig, 2002):

$$P = \pi\mu_0\chi_0H^2f \frac{2\pi f\tau}{(1 + 2\pi f\tau)^2} \quad (3)$$

Burada, f uygulanan frekans, H uygulanan manyetik alan genliği, χ_0 manyetik duygunluk, τ etkin gevşeme süresi ve μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğidir.

MFH çalışmalarında, MNP'lerin ısıtma özellikleri genellikle birim kütle başına harcanan güç olarak tanımlanan SAR cinsinden Eşitlik 4 ile ifade edilir.

$$SAR = \frac{P}{m} \quad (4)$$

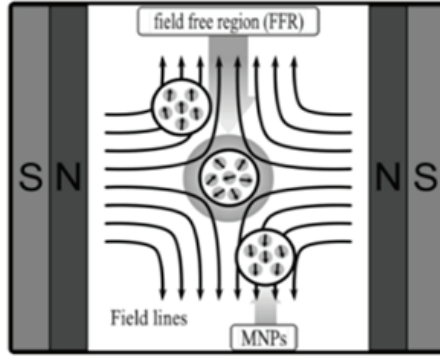
burada m ve P sırasıyla MNP kütlesi ve harcanan güçtür.

MFH tedavisinde komşu sağlıklı dokuya zarar vermemek için tedavi edilen bölgedeki sıcaklık artışı 46 °C'yi geçmemelidir (Deatsch & Evans, 2014). Bu nedenle, MNP'nin neden olduğu sıcaklık artışını kontrol etmek için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Örneğin, Curie sıcaklığında MNP'ler harici bir manyetik alanla hizalanma yeteneklerini kaybederler ve bunun sonucunda ısı üretimi kontrol edilir. Bu mekanizmayı kullanan Zhang ve ark. AMF'ye maruz kaldığında maksimum 44 °C sıcaklığa ulaşan Co-Zn ferrit MNP geliştirmiştir (Zhang et al., 2017).

MFH uygulamalarındaki zorluk, tümör bölgesine enjekte edilen MNP'lerin kollateral dokulara sıvı difüzyonu ile zamanla geçmesidir. Bu da sağlıklı dokuların istenmeyen şekilde ısınmasına neden olmaktadır. MNP'ler tümörün etrafındaki sağlıklı dokulara yayılacağından, çevredeki normal dokulara zarar vermeden tümörü hassas bir şekilde ısıtmak son derece zor hale gelir. Manyetik parçacıkların normal dokulara dağılması kaçınılmaz olduğunda, ısıyı tümörler üzerinde yoğunlaştırmak için bir mekanizma oluşturulmalıdır. Sonuç olarak, sıcaklık artışını kontrol etmek için çeşitli yaklaşımlar araştırılmıştır. Teorik ve deneysel araştırmalara göre AMF etkisi altındaki MNP davranışları, MFH testlerine statik manyetik alan (SMF) kaynakları eklenerek değiştirilebilir (Bauer et al., 2016b), (Murase, 2016), (Dhavalikar & Rinaldi, 2016), (Cantillon-Murphy et al.,

2010). SMF gradyan modeli MFH test ortamına dahil edilirse konumlarına bağlı olarak MNP'lerin SAR değeri değişebilir.

SMF kaynakları, Şekil 1'de gösterildiği gibi, çalışma alanında bir gradyan modeli ile sonuçlanan manyetik akı yoğunluk vektörlerini bükecek şekilde konumlandırılır. Oluşan bu bölgeye manyetik alansız bölge (FFR) adı verilir. FFR'deki MNP'ler, AMF'nin etkisi altında serbestçe salınır. AMF'ye rağmen, SMF gradyanından etkilenen MNP salınımları ya sınırlıdır ya da tamamen bloke edilir.



Şekil 1. Gradyan deseni ve FFR oluşumu.

SMF'nin ekstra etkisiyle MNP'nin ısıtma özelliklerini azaltabileceğini veya bastırabileceğini gösteren çalışmalar mevcuttur. Bunun en güzel örneği manyetik rezonans görüntüleme (MRI) sistemlerine MFH için gerekli bobin eklenmesidir. Bu bobin MFH için gerekli AMF'yi üretir. Yaklaşık 200 mT gibi düşük alanlı MRI cihazları tarafından üretilen ve küçük boyuta sahip (>10 nm) MNP için SMF değerleri MNP'lerin manyetik momentlerini doygunluğa ulaştırır. MNP'nin dinamik manyetizasyonu değişmeden kalır ve sonuç olarak ısı açığa çıkmaz (Cantillon-Murphy et al., 2010).

Bauer ve ark. (Bauer et al., 2016b) tarafından yapılan çalışmada, neodimyum mıknatısın manyetik alanına maruz bırakılmış MNP'lerin SAR değerinde azalma gözlemlenmiştir. Hensley ve ark. (Hensley et al., 2017), merkezde sıfır manyetik alana sahip bir bölge oluşturmak için zıt mıknatıslanma yönlerine sahip bir çift neodimyum mıknatıs kullanmıştır. FFR'deki MNP'lerin yüksek bir SAR sergiledikleri gözlemlenmiştir. FFR dışındaki MNP'ler manyetik doygunluk durumunda oldukları için herhangi bir sıcaklık artışı gözlemlenmemiştir. Aynı prensip, Taşçı ve ark. tarafından bir çift SMF üreten bobin kullanılarak uygulanmıştır (Tasci et al., 2009).

MNP'ler bir fare kuyruğundaki üç farklı yere yerleştirilmiştir. Isıtma yalnızca uç kısımda bulunan MNP'lere odaklanmıştır. Benzer bir araştırmada, Tay ve ark. (Tay et al., 2018), iki tümörlü bir fareye hipertermi tedavisi uygulayarak sadece FFR içinde bulunan tümörü başarıyla hedeflemiştir. Benzer şekilde Murase ve ark. (Murase et al., 2013) bir çift bobin kullanarak MNP'yi farklı SMF değerlerine maruz bırakmışlar ve uygulanan SMF değeri arttıkça MNP'nin SAR değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

MNP'lerde Curie sıcaklığının kontrolü demir oksit MNP'nin kimyasal modifikasyonunu gerektirir. Bu modifikasyon biyoyoumluluğu etkiler veya karmaşık bir üretim prosedürü gerektirir. Ayrıca, bu yöntemler, MNP tarafından elde edilebilecek maksimum sıcaklığı dinamik olarak kontrol etmek yerine, MNP'nin belirli bir sıcaklığın üzerindeki ısıtma kabiliyetini "kapatarak" sadece sıcaklığı sınırlar. MNP'nin ısıtma özelliklerini SMF kullanarak kontrol etmenin daha iyi bir yaklaşım olduğu söylenebilir. Çünkü bu, herhangi bir ek kimyasal modifikasyon olmadan normal manyetitin (Fe_2O_3) kullanımına izin vermektedir.

2. YÖNTEM

Tablo 1, literatürde SMF kaynaklarını kullanan MFH çalışmalarının bir karşılaştırmasını göstermektedir. Manyetik akı yönü, manyetik akı yoğunlukları, genlik, frekans ve salınım yönleri gibi SMF ve AMF kaynaklarının fiziksel özellikleri Tablo 1'de gösterildiği gibi farklı deneylerde çeşitli değerler alabilir.

Tablo 1. MFH çalışmalarında kullanılan SMF kaynaklarının karşılaştırılması.

SMF kaynağı/ yoğunluk	SMF kaynaklarının sayısı / Akı yönü	SMF yönü	AMF bobin hizalaması / Salınım yönü / Yoğunluk	Kaynak
Sabit mıknatıs / 2,6 mT - 15,4 mT	Tek mıknatıs veya bir çift mıknatıs / aynı yön	z yönünde (uzunlamasına)	Dikey / z yönünde / H = 16 kA/m	(Bauer et al., 2016a)
DC beslemeli bobin	Bir çift / zıt yön	y yönünde (uzunlamasına)	Yatay / y yönünde / H = 4,5 kA/m	(Tasci et al., 2009)
Sabit mıknatıs / 5mT - 0.2 T	Bir çift / zıt ve aynı yön	y yönünde (enine)	Dikey / z yönünde / H = 34 kA/m	(Ma et al., 2015)
DC beslemeli bobin	Bir çift / aynı yön	y yönünde (enine)	Dikey / z yönünde / H 1.1, 1.5, 1.9 kA/m	(Murase et al., 2013)
DC beslemeli bobin	Bir çift / aynı yön	z yönünde (enine)	Yatay / y yönünde / H = 7 kA/m	(Zhao et al., 2012)

MPI ve MFH çalışmalarında seçim alanı oluşturmak için sabit mıknatıslar ve elektromıknatıslar kullanılabilir. Örneğin sabit mıknatıslar (Mura-se et al., 2014), (Patrick Vogel et al., 2019), (Bakenecker et al., 2020), (Meribout & Kalra, 2020) ve elektromıknatıslar (Erbe et al., 2011), (Smolik et al., 2012), (P Vogel et al., 2016), (Top & Gungor, 2020) kullanılır. Sabit mıknatıslar, elektromıknatıslara kıyasla maliyet, güç tüketimi ve uygulama açısından avantajlıdır. NdFeB (neodim-demir-bor) mıknatıslar yüksek bir manyetik alana sahiptirler. Ayrıca hafif, dayanıklı ve ucuzdurlar (Demas & Prado, 2009). Bir çift sabit mıknatıs veya mıknatıs sistemi, aynı mıknatıs kutupları birbirine baktığında bir FFR oluşturabilir. Bir mıknatıs sistemi genellikle bir mıknatıs bloğundan oluşur (Halbach, 1980), (Raich & Blümler, 2004), (Soltner & Blümler, 2010), (Baun & Blümler, 2017).

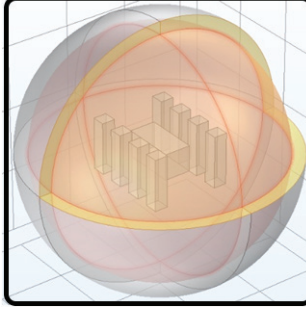
Hedeflemeli MFH’de gradyan örüntüsü haritalaması oldukça önemli olmasına rağmen, anılan çalışmaların hiçbiri bu konuyu ayrıntılı olarak irdelememiştir. FFR’yi belirli hedef konumlara odaklayabilen kalıcı mıknatıs dizilerine sahip bir sistem ve bu sistemin oluşturduğu SMF’nin MNP’lerin ısıtmasını kontrol edebilme özellikleri burada açıklanmıştır. Bu amaçla, bilgisayar simülasyonları kullanılarak SMF’nin MNP ısıtma özellikleri üzerindeki etkisi üzerinde durulmuştur. Kalıcı mıknatıs dizilerinin farklı konfigürasyonları, FEM tabanlı multifizik yazılımı kullanılarak benzetim gerçekleştirilmiştir. Birbirinin karşısına yerleştirilmiş iki sıra kalıcı mıknatıs dizisinden 3B geometrik model oluşturulmuştur. Her bir dizi, $10 \times 10 \times 40 \text{ mm}^3$ boyutunda dört kalıcı mıknatıstan oluşur. Simülasyon programı “AC/DC manyeto-static, no current” modundayken Eşitlik 5’i kullanır. Böylece 3B çalışma alanında elde edilecek manyetik akı yoğunluğunu hesaplanır.

$$\nabla \mathbf{B} = 0 \Rightarrow -\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla V_m - \mathbf{B}_r) = 0 \quad (5)$$

burada μ_0 boş alanın geçirgenliği, μ_r mıknatısın görelî geçirgenliği ve \mathbf{B}_r kalan manyetik akı yoğunluğudur. B ve H arasındaki ilişki Eşitlik 6 ile sağlanabilir;

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad (6)$$

3B uzayda modellenen simülasyon ortamı, Şekil 2’de gösterildiği gibi kaynak mıknatıslar, hedef nesne ve deney ortamından oluşur.

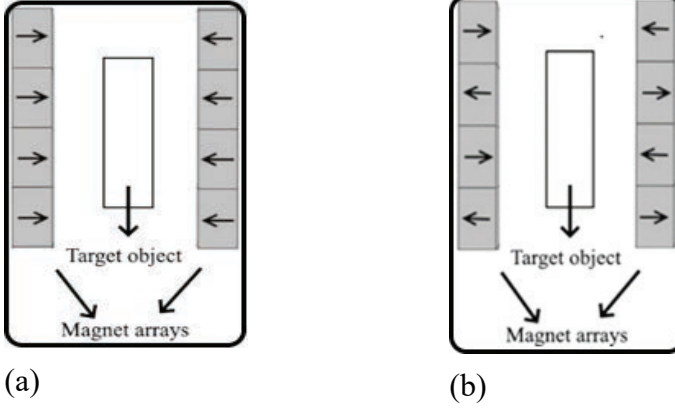


Şekil 2. Benzetim ortamı görüntüsü.

Deney ortamı 100 mm yarıçaplı bir küredir ve merkezi (0, 0, 0) mm konumundadır. Kaynak mıknatıslar oluşturulurken sırasıyla μ_r ve B_r için simülasyon girdileri olarak 1,05 ve 1,47 değerleri girilir. Mıknatısların ağırlık merkezi, sağ dizi için (25, d, 0) mm ve sol dizi için (-25, d, 0) mm noktalarında bulunur. d değeri, her iki taraf için y eksenindeki dizi elemanlarının mesafesidir ve 10, 30, -10, -30 mm değerlerine sahiptir. Hedef nesne, y eksenini boyunca uzanan ve ağırlık merkezi (0, 0, 0) mm'de bulunan bir bloktur. Genişliği, derinliği ve yüksekliği sırasıyla 20 mm, 40 mm ve 20 mm'dir. Bu blok, in vitro uygulamalar için bir test tüpü için temsili bir model veya in vivo uygulamalar için küçük bir test hayvanı olabilir.

3. BULGULAR

Simülasyon ortamında, aynı yönlü dizilim durumu için dizilerin her iki tarafı için N kutupları hedefe doğru yönlendirilir (bkz. Şekil 3 a). İkinci olarak, sol taraftaki dizinin mıknatıs kutup yönleri tersine çevrilir. Üçüncü olarak, mıknatıslar zıt yön dizilimi durumunda düzenlenir (bkz. Şekil 3 b). Son olarak, ters yön dizilimi için sol taraftaki dizinin mıknatıs kutup yönleri tersine çevrilir. Bu 4 durum; Durum 1, Durum 2, Durum 3 ve Durum 4 olarak adlandırılmıştır. Tüm durumlar için kutup yönelimleri Tablo 2'de özetlenmiştir.



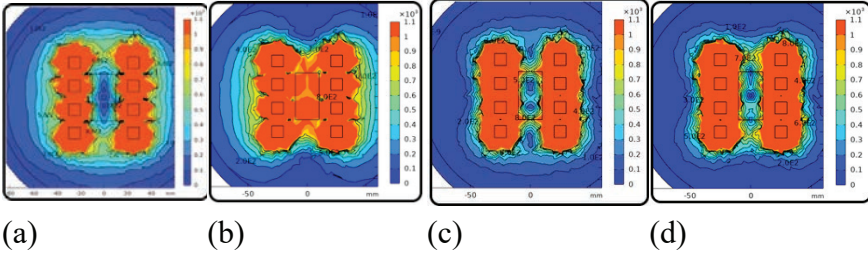
Şekil 3. (a) aynı ve (b) zıt yön dizilimi için kutup düzenlemeleri.

Tablo 2. Tüm durumlar için kutup yönelimleri.

Aynı yönlü elemanlar dizisi			
Durum 1		Durum 2	
Sol taraf	Sağ taraf	Terslenmiş sol taraf	Sağ taraf
(x, y, z)	(x, y, z)	(x, y, z)	(x, y, z)
(1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)
(1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)
(1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)
(1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)

Zıt yönlü elemanlar dizisi			
Durum 3		Durum 4	
Sol taraf	Sağ taraf	Terslenmiş sol taraf	Sağ taraf
(x, y, z)	(x, y, z)	(x, y, z)	(x, y, z)
(1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)
(-1,0,0)	(1,0,0)	(1,0,0)	(1,0,0)
(1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)	(-1,0,0)
(-1,0,0)	(1,0,0)	(1,0,0)	(1,0,0)

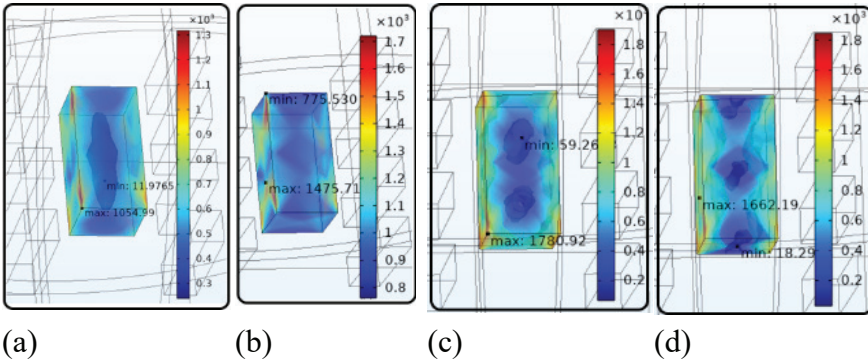
Kutupları simülasyon ortamında yönlendirerek, her iki durumun sol taraf tersine çevrilmiş aynı ve zıt yön dizilimleri için gradyan desenleri sırasıyla Şekil (4a), (4b), (4c), (4d)'de gösterilmektedir.



Şekil 4. (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3, (d) Durum 4 için gradyan desenlerinin kontur gösterimi

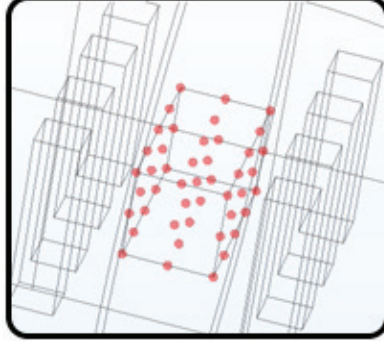
Kontur gösterimler incelendiğinde, FFR ve SMF gradyan örüntüleri hakkında bazı bulgular ortaya çıkmaktadır. Durum 1 için, SMF kaynaklarından gelen akı çizgilerinin birbirini büktüğü ve aynı kutup yönlü dizi için hedef nesne üzerinde FFR'nin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu FFR çubuk veya çizgi şeklinde olduğundan bu bölge manyetik alansız çizgi (FFL) olarak adlandırılabilir. Durum 2 için, sol taraftaki mıknatısların kutupları ters çevrilir ve vektör çizgileri birbirini destekler. Bu sefer SMF gradyan deseninin FFR'siz hedef nesneyi kapladığı görülür. Durum 3 için, hedef nesne üzerinde iki ayrı FFR meydana gelir. Konumları orta noktanın alt ve üst kısmındadır. Durum 4 için, hedef nesne üzerinde üç ayrı FFR meydana gelir. Konumları hedef nesnenin alt ucunda, üst ucunda ve ortasındadır. Durum 3 ve Durum 4 için, FFR'ler nokta şeklinde meydana gelir. Bu nedenle bu bölgeler manyetik alansız nokta (FFP) olarak adlandırılabilir.

FFR yapılarının daha iyi anlaşılabilmesi için simülasyon ortamında 3 boyutlu çizimler oluşturulur. FFP ve FFL, 3B simülasyon ortamında daha net görünümlere sahiptir. Hedef üzerindeki manyetik akı yoğunluk noktalarının maksimum ve minimum genlikleri, Durum 1, Durum 2, Durum 3 ve Durum 4 için sırasıyla 1054 G-11 G, 1475 G-775 G, 1780 G-59 G, 1662 G-18 G'dir. (bkz. Şekil 5).



Şekil 5. (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3, (d) Durum 4 için hedef nesnede 3B FFR gösterimleri

FFR'lerin kritik noktalarının analizi için, simülasyon ortamında hedef nesneye yerleştirilen nokta problemleri Şekil 6'da gösterilmiştir. 45 nokta probunun koordinatları Tablo 3'te listelenmiştir. Çalışma alanındaki dört durum için problemlerdeki **B** değerleri ölçülmüş ve Tablo 4 listelenmiştir.



Şekil 6. Hedef nesnelere çoklu problemlerin gösterimi.

Tablo 3. B için prob konumları.

x	10, 0, -10 (mm)
y	20, 10, 0, -10, -20 (mm)
z	10, 0, -10 (mm)

4. SONUÇLAR

Literatürde MFH deneylerinin koşulları çok değişkendir. Örneğin, AMF yoğunluğu 0,8 ila 115 kA/m arasında değişebilir (Kastner et al., 2015). Gradyan örüntülerinde MNP salınımlarına izin vermek için SMF yoğunluğunun sınır değeri 314 G'nin (yaklaşık 25 kA/m) altında seçilirse, Tablo 4'teki renkli bölgeler FFR'nin bir parçası olarak tanımlanabilir. AMF yoğunluğu SMF sınır değerinden fazlaysa, FFR'de kalan MNP'ler SAR üretecektir. MNP'ler, AMF genliğinin SMF'den düşük olduğu bölgelerdeyse, SAR değeri kısıtlanacaktır. 314 G'nin altındaki noktaların sayısı Durum 1, Durum 2, Durum 3 ve Durum 4 için sırasıyla 16, 0, 9 ve 11'dir. Simülasyon sonuçlarında görüldüğü üzere FFR odağının hedef nesnenin farklı bölgelerine yönlendirilebildiği ve FFR formunun çizgi benzeri veya nokta benzeri formlara değiştirilebildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4. Noktasal problemlerle B(G) ölçümleri.

	Durum 1			Durum 2			Durum 3			Durum 4		
(y,z)	x = 10	x = 0	x = 10	x = 10	x = 0	x = -10	x = 0	x = -10	x = -10	x = 10	x = 0	x = -10
(20, 10)	442	282	1421	716	809	1311	1768	692	3646	1632	43	3541
(10, 10)	285	96	1131	824	934	1674	573	85	1508	612	519	1527

(0, 10)	417	50	378	976	892	788	1209	263	1263	1219	57	1256
(-10, 10)	866	103	1115	1407	936	1659	875	57	1490	907	503	1513
(-20, 10)	554	313	960	837	779	1502	1633	728	520	1507	64	391
(20, 0)	502	226	607	603	1022	961	1650	539	1478	1468	148	1277
(10, 0)	565	97	823	1167	977	1453	791	91	1191	845	270	1265
(0, 0)	343	76	245	971	1002	876	845	285	1091	850	86	1090
(-10, 0)	1255	106	1028	1860	1056	1637	1295	150	1141	1351	409	1199
(-20, 0)	625	248	255	919	1016	752	1628	671	344	1448	255	206
(20, -10)	980	262	762	779	846	1131	2289	726	907	2179	31	713
(10, -10)	499	97	734	1043	939	1280	474	68	764	513	523	810
(0, -10)	341	41	610	673	906	952	1378	267	1721	1381	86	1718
(-10, -10)	264	110	875	787	947	1428	464	66	1205	471	502	1222
(-20, -10)	414	270	1998	771	852	1724	1751	696	3043	1560	40	2932

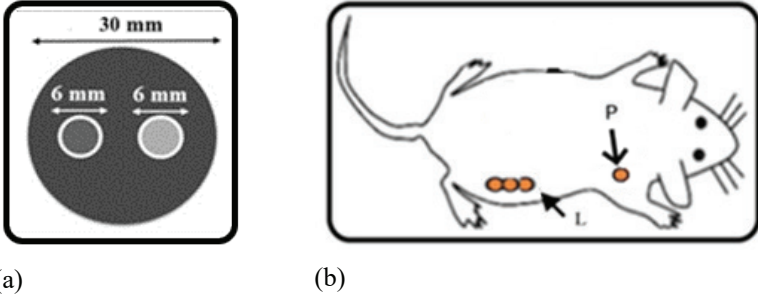
MHT çalışmalarındaki çalışma alanlarının ve hedef nesnelerin karşılaştırması Tablo 5’de gösterilmiştir. Çalışma alanları, in vitro ve in vivo testler için genellikle sarmal şekilli çalışma bobininin iç hacmidir. Hedef nesneler, test tüpleri veya küçük hayvanlar olarak seçilmiştir.

Tablo 5. Deney düzeneklerinde çalışma alanlarının ve hedef nesnelerin karşılaştırılması.

Test tipi	Çalışma alanının özellikleri	Hedef nesnelerin özellikleri	Kaynak
In vitro	Bobinin yarıçapı, $r \approx 5$ cm Çalışma alanının kesit alanı ≈ 78.5 cm ² .	Bobinin merkezinde bulunan bir test tüpü, tübün yarıçapı, $r \approx 0,5$ cm, hedef alan ≈ 0.785 cm ² .	(Bauer et al., 2016a)
In vitro	Bobinin yarıçapı ve yüksekliği, $r \approx 2$ cm, $h \approx 6$ cm Çalışma alanının kesit alanı ≈ 24 cm ² .	0,4 cm çapında üç küresel plastik tüp. İlk tüp merkeze (FFR'nin içine) ve diğer ikisi orta tübün 2 cm soluna ve sağına yerleştirildi,	(Tasci et al., 2009)
In vivo	Yukarıdaki ile aynı	tüplerin yarıçapı, $r \approx 0,2$ cm, hedef alan $\approx 0,126$ cm ² . Bobin merkezinde bulunan 200 g yetişkin sıçanın kuyruğu	(Tasci et al., 2009)
In vitro	3 cm çapında bobin	Çalışma alanı kesitinin yaklaşık 1/8'i ≈ 3 cm ² .	(Ma et al., 2015)
In vitro	3 cm çapında bobin	İki fantom, bobinin ısıtma bölgesine yakın durur (20 mm). Numune içeren deney tüpünün çapı 8 mm, hedef alan $\approx 0,502$ cm ² .	(Murase et al., 2013)

Bir solenoid bobin (4 cm çapında ve 10 cm uzunluğunda).	4,9 mm yarıçaplı küresel çekirdek.	(Zhao et al., 2012)
In vivo Çalışma alanının kesit alanı $\approx 40 \text{ cm}^2$.		

Ferrofluid içeren test tüpleri ve küçük hayvanların bölgesel tümör kitleleri, Şekil (7a) ve (7b)'de gösterildiği gibi hedef nesne olarak kabul edilebilir.



Şekil 7. (a) *in vitro* testler için hedef tüplerin, (b) *in vivo* testler için hedef tümörlerin şematik gösterimi.

Hedeflemeli MFH için, FFR ve hedef örtüşmesi, SMF kaynağının ve/veya hedef nesnenin uygun şekilde yerleştirilmesiyle elde edilebilir. Çalışma alanı ve hedef nesnelerin enine kesit bölgesi incelendiğinde, simülasyonda 0haritalanan gradyan desenlerinin *in vitro* MFH deneyleri için oldukça uygun olduğu görülebilir. *In vivo* MFH deneyleri için, oluşturulan haritalar FFR için bir bakış açısı verir. Gradyan örüntüsü ve tümörün şekli ve konumu uyumlu olmalıdır. Bunu başarmak için, her deneyin özel koşulları dikkate alınmalıdır. Gradyan örüntü haritalaması yardımıyla farklı tümör geometrileri için uygun FFR'ler belirlenebilir. Şekil (7b)'de gösterildiği gibi L harfi ile gösterilen çizgi benzeri bir tümör kitleleri varsa Şekil (5a)'daki örüntüler seçilebilir. Şekil (7b)'de P harfi ile gösterilen nokta benzeri bir tümör varsa Şekil (5c) gibi daha uygun örüntü seçilebilir.

Hastanın pozisyonunu değiştirmeden FFR'yi tümör üzerinde hareket ettirerek herhangi bir şekildeki bir tümörü ablasyon kapasitesi gelecekteki araştırmalar için kritik öneme sahiptir. Bu, MFH uygulamalarında FFR'nin konumunu ve biçimini ayarlamamanın önemini vurgular. Çok hassas robotik cihazlar kullanarak FFR'yi değiştiren tasarımlar, gelecekte her hastanın kendine özgü özel koşulları için araştırılabilir.

Bu çalışmada hedeflemeli MFH testlerinde kullanılmak üzere kalıcı mıknatıs dizileri ile oluşturulan gradyan deseninin haritalanması açıklanmıştır. Bulgular, klinik deneylerden önce gerçekleştirilen in vitro ve in vivo MFH testleri için faydalıdır.

5. KAYNAKLAR

- Bakenecker, A. C., Schumacher, J., Blümler, P., Gräfe, K., Ahlborg, M., & M Buzug, T. (2020). A concept for a magnetic particle imaging scanner with Halbach arrays. *Physics in Medicine & Biology*, 65(19), 195014. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab7e7e>
- Bauer, L. M., Situ, S. F., Griswold, M. A., & Samia, A. C. S. (2016a). High-performance iron oxide nanoparticles for magnetic particle imaging-guided hyperthermia (hMPI). *Nanoscale*, 8(24), 12162–12169. <https://doi.org/10.1039/c6nr01877g>
- Bauer, L. M., Situ, S. F., Griswold, M. A., & Samia, A. C. S. (2016b). High-performance iron oxide nanoparticles for magnetic particle imaging – guided hyperthermia (hMPI). *Nanoscale*, 8(24), 12162–12169. <https://doi.org/10.1039/C6NR01877G>
- Baun, O., & Blümler, P. (2017). Permanent magnet system to guide superparamagnetic particles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 439, 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.05.001>
- Cantillon-Murphy, P., Wald, L. L., Zahn, M., & Adalsteinsson, E. (2010). Proposing magnetic nanoparticle hyperthermia in low-field MRI. *Concepts in Magnetic Resonance Part A*, 36A(1), 36–47. <https://doi.org/10.1002/cmra.20153>
- Chang, D., Lim, M., Goos, J. A. C. M., Qiao, R., Ng, Y. Y., Mansfeld, F. M., Jackson, M., Davis, T. P., & Kavallaris, M. (2018). Biologically Targeted Magnetic Hyperthermia: Potential and Limitations. *Frontiers in Pharmacology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00831>
- Deatsch, A. E., & Evans, B. A. (2014). Heating efficiency in magnetic nanoparticle hyperthermia. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 354, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.11.006>
- Demas, V., & Prado, P. J. (2009). Compact magnets for magnetic resonance. *Concepts in Magnetic Resonance Part A*, 34A(1), 48–59. <https://doi.org/10.1002/cmra.20131>
- Dhavalikar, R., & Rinaldi, C. (2016). Theoretical predictions for spatially-focused heating of magnetic nanoparticles guided by magnetic particle imaging field gradients. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 419, 267–273. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.06.038>
- Erbe, M., Knopp, T., Sattel, T. F., Biederer, S., & Buzug, T. M. (2011). Experimental generation of an arbitrarily rotated field-free line for the use in magnetic particle imaging. *Medical Physics*, 38(9), 5200–5207. <https://doi.org/10.1118/1.3626481>
- Halbach, K. (1980). Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. *Nuclear Instruments and Methods*, 169(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(80\)90094-4](https://doi.org/10.1016/0029-554X(80)90094-4)

- Hensley, D., Tay, Z. W., Dhavalikar, R., Zheng, B., Goodwill, P., Rinaldi, C., & Conolly, S. (2017). Combining magnetic particle imaging and magnetic fluid hyperthermia in a theranostic platform. *Physics in Medicine and Biology*, 62(9), 3483–3500. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa5601>
- Kastner, E. J., Reeves, R., Bennett, W., Misra, A., Petryk, J. D., Petryk, A. A., & Hoopes, P. J. (2015). *Alternating magnetic field optimization for IONP hyperthermia cancer treatment* (T. P. Ryan (ed.); p. 93260M). <https://doi.org/10.1117/12.2083196>
- Ma, M., Zhang, Y., Shen, X., Xie, J., Li, Y., & Gu, N. (2015). Targeted inductive heating of nanomagnets by a combination of alternating current (AC) and static magnetic fields. *Nano Research*, 8(2), 600–610. <https://doi.org/10.1007/s12274-015-0729-7>
- Meribout, M., & Kalra, M. (2020). A portable system for two dimensional magnetic particle imaging. *Measurement*, 152, 107281. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107281>
- Murase, K. (2016). A Simulation Study on the Specific Loss Power in Magnetic Hyperthermia in the Presence of a Static Magnetic Field. *Open Journal of Applied Sciences*, 06(12), 839–851. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2016.612073>
- Murase, K., Aoki, M., Banura, N., Nishimoto, K., Mimura, A., Kuboyabu, T., & Yabata, I. (2015). Usefulness of Magnetic Particle Imaging for Predicting the Therapeutic Effect of Magnetic Hyperthermia. *Open Journal of Medical Imaging*, 05(02), 85–99. <https://doi.org/10.4236/ojmi.2015.52013>
- Murase, K., Hiratsuka, S., Song, R., & Takeuchi, Y. (2014). Development of a system for magnetic particle imaging using neodymium magnets and gradiometer. *Japanese Journal of Applied Physics*, 53(6), 067001. <https://doi.org/10.7567/JJAP.53.067001>
- Murase, K., Takata, H., Takeuchi, Y., & Saito, S. (2013). Control of the temperature rise in magnetic hyperthermia with use of an external static magnetic field. *Physica Medica*, 29(6), 624–630. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2012.08.005>
- Raich, H., & Blümler, P. (2004). Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR Mandhalas. *Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering*, 23B(1), 16–25. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.20018>
- Roesch, M., & Mueller-Huebenthal, B. (2015). Review: The Role of Hyperthermia in Treating Pancreatic Tumors. *Indian Journal of Surgical Oncology*, 6(1), 75–81. <https://doi.org/10.1007/s13193-014-0316-5>
- Rosensweig, R. E. (2002). Heating magnetic fluid with alternating magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 252, 370–374. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00706-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00706-0)

- Smolik, W. T., Wroblewski, P. R., & Szyszko, J. (2012). Numerical modeling of magnetic field for magnetic particle imaging. *2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques Proceedings*, 436–441. <https://doi.org/10.1109/IST.2012.6295571>
- Soltner, H., & Blümner, P. (2010). Dipolar Halbach magnet stacks made from identically shaped permanent magnets for magnetic resonance. *Concepts in Magnetic Resonance Part A*, *36A*(4), 211–222. <https://doi.org/10.1002/cmra.20165>
- Tasci, T. O., Vargel, I., Arat, A., Guzel, E., Korkusuz, P., & Atalar, E. (2009). Focused RF hyperthermia using magnetic fluids. *Medical Physics*, *36*(5), 1906–1912. <https://doi.org/10.1118/1.3106343>
- Tay, Z. W., Chandrasekharan, P., Chiu-Lam, A., Hensley, D. W., Dhavalikar, R., Zhou, X. Y., Yu, E. Y., Goodwill, P. W., Zheng, B., Rinaldi, C., & Conolly, S. M. (2018). Magnetic Particle Imaging-Guided Heating in Vivo Using Gradyan Fields for Arbitrary Localization of Magnetic Hyperthermia Therapy. *ACS Nano*, *12*(4), 3699–3713. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b00893>
- Top, C. B., & Gungor, A. (2020). Tomographic Field Free Line Magnetic Particle Imaging With an Open-Sided Scanner Configuration. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, *39*(12), 4164–4173. <https://doi.org/10.1109/TMI.2020.3014197>
- Vogel, P., Rückert, M. A., Klauer, P., Kullmann, W. H., Jakob, P. M., & Behr, V. C. (2016). First in vivo traveling wave magnetic particle imaging of a beating mouse heart. *Physics in Medicine and Biology*, *61*(18), 6620–6634. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/18/6620>
- Vogel, Patrick, Markert, J., Rückert, M. A., Herz, S., Keßler, B., Dremel, K., Althoff, D., Weber, M., Buzug, T. M., Bley, T. A., Kullmann, W. H., Hanke, R., Zabler, S., & Behr, V. C. (2019). Magnetic Particle Imaging meets Computed Tomography: first simultaneous imaging. *Scientific Reports*, *9*(1), 12627. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48960-1>
- Zhang, W., Zuo, X., Niu, Y., Wu, C., Wang, S., Guan, S., & Silva, S. R. P. (2017). Novel nanoparticles with Cr 3+ substituted ferrite for self-regulating temperature hyperthermia. *Nanoscale*, *9*(37), 13929–13937. <https://doi.org/10.1039/C7NR02356A>
- Zhao, Q., Wang, L., Cheng, R., Mao, L., Arnold, R. D., Howerth, E. W., Chen, Z. G., & Platt, S. (2012). Magnetic nanoparticle-based hyperthermia for head & neck cancer in mouse models. *Theranostics*, *2*(1), 113–121. <https://doi.org/10.7150/thno.3854>

Bölüm 17

METALİK KÖPÜKLER VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Berkant DİNDAR¹

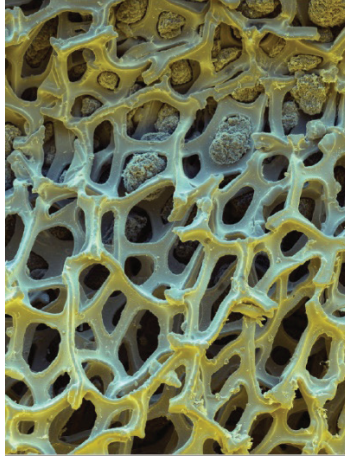
¹ Dr. Öğretim Üyesi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tokat, Türkiye, berkant.dindar@gop.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1215-3621>

1. Giriş

Sıvı içerisindeki gaz kabarcıkları köpük olarak adlandırılmaktadır. Sıvının hızla katılaştırılması durumunda gözenekli bir yapı oluşarak katı köpük meydana gelir. Sıvı köpüklerdeki yüzey geriliminin düşük tutulma ihtiyacı katı köpük oluşumunda da geçerlidir. Fakat sıvılara kıyasla katılar üzerinde farklı boyutlardaki hücre yapıları katılarda rahatlıkla oluşturulabilmektedir. Kısaca metalik köpükler katı metal malzemelerden meydana gelen ancak hacminin büyük bir bölümü gazla dolu gözeneklerin oluşturduğu yapılara sahiptirler. Metalik köpükler içerdikleri boşluklara göre kapalı ve açık gözenekli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Endüstriyel yönden bakıldığında köpüklü katılar arasında metalik köpükler öncül bir önem arz etmektedir [1]. Metalik köpük üretiminde kurşun, çinko, nikel demir, metalik köpük yapımına uygun malzemelerdir. Ancak alüminyum köpüğü iyi korozyon dayanımı, düşük ergime sıcaklığı ve düşük yoğunluğundan dolayı günümüzde üzerinde en çok çalışılan türdür [2]. Bundan dolayı alüminyum köpüklere bu bölümde ağırlık verilmiştir.

Metalik köpükler, ilginç bir biyonomik hücresel malzeme sınıfıdır. Kemik, mantar, ahşap gibi malzeme yapılarının metalik malzemelere uyarlanması sonucunda oluşturuldukları için biyomimetik tasarım olarak da kabul edilebilirler. Şekil 1'de metalik köpüğün gözenekli yapısı görülmektedir.



Şekil 1: Metalik köpüğün gözenek yapısı [1]

İlk metalik köpük 1943 yılında Benjamin Sosnik tarafından alüminyumun civa ile köpürtülmesi ile elde edilmiştir. Bu kapsamda Sosnik ilk olarak alüminyum ve civayı kapalı bir kap içerisinde yüksek basınç altında eritmiştir. Daha sonra alüminyumun ergime sıcaklığında basıncı ortadan kaldırarak civanın buharlaşmasını sağlamış ve köpük yapıyı elde

etmiştir [1]. Daha sonra viskozite yani akışkanlığın artırılmasıyla daha fazla köpük üretilebileceği anlaşılmıştır.

Günümüzde ise birçok firma metalik köpük üretimi yapmaktadır. Bunlardan önde gelenlerinden biri Japon Shinko Wire şirkettir. Bu şirket, 1986 yılından beri patentli yöntemi ile metalik ergiye öncelikle kalsiyum ilavesi yaparak viskozitesini arttırmakta ve daha sonra TiH_2 'nin direkt enjekte ederek metalik köpük üretmektedir [3].

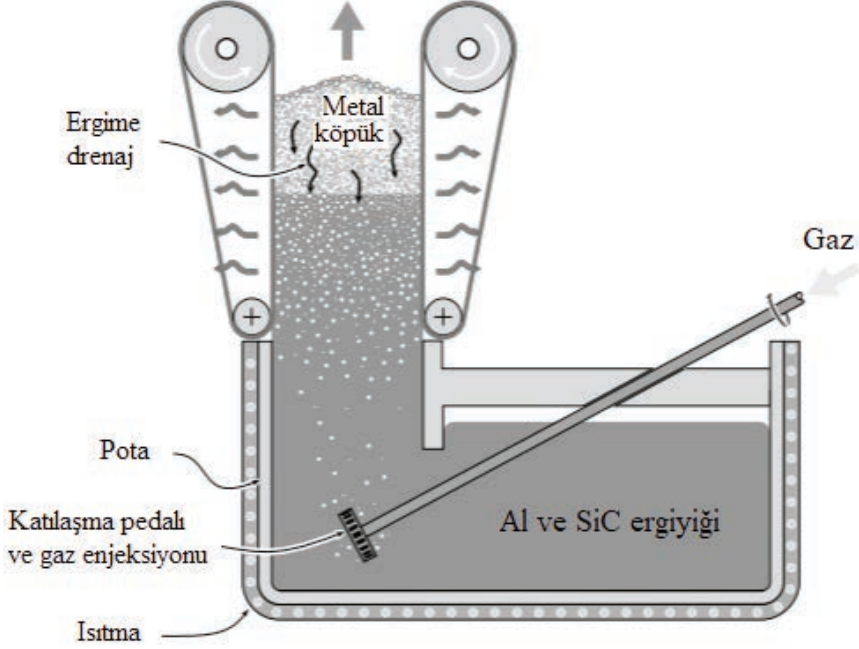
2. Mekanik Köpüklerin Üretim Metodları

Açık ve kapalı tip metalik köpükler farklı metodlar ile üretilebilmektedir. Açık hücreli köpükler döküm ve toz metalürjisi ile oluşturulabilmektedir. Kapalı tipte ise erimiş metale gaz uygulanarak kabarcıklar kabarcıklar oluşturulur. Daha sonra kabarcıkların yüzeye çıkmasını engellemek amacı ile eriyik haldeki metalin viskozitesi azaltılmaktadır. Viskozitesi azaltıldıktan sonra bünyesinde boşluklar oluşturulan erimiş metaller soğutularak metalik köpük haline gelirler. Üretimin devamında metalik köpüklere çeşitli haddeleme ve ekstrüzyon işlemleri ile istenilen şekiller verilebilmektedir. Ayrıca ergiyik haldeki bir metalin içinde çözülün gazın çökmesi sağlanarak veya eritilen metale köpürtücü tozlar ilave edilerek de üretilmeleri mümkündür. Bu üretim yöntemleri alt başlıklar halinde detaylıca açıklanmıştır.

2.1. Ergiyik Metal İçerisine Gaz Enjektisi İle Metalik Köpük Üretimi (hydro/alcan)

Bu üretim işleminde metal ergiyeğin viskozitesini arttırmak için %10-30 oranında silisyum-karbür, magnezyum oksit veya alüminyum oksit partikülleri eklenmektedir. Bundan dolayı ilk adımda bir metal matrisli kompozit meydana gelmektedir. Burada partiküllerin homojen bir şekilde dağılması önemlidir bu yüzden gelişmiş karıştırma teknikleri gerekmektedir [4].

Sonraki adımda ise dönen çarklar veya titreşimli nozullar ile ergiyeğin içerisine azot, hava, argon gibi gazlar enjekte edilerek metal ergiyik köpürtülür. Bu gazlar ergiyeğin yapısında ince kabarcıklar meydana getirirler. Seramik partiküller ergiyik metal içinde olduğunda karışım nispeten kararlıdır. Sonrasında ergiyik soğutularak metalik köpüğe dönüştürülür [4], (Şekil. 2).

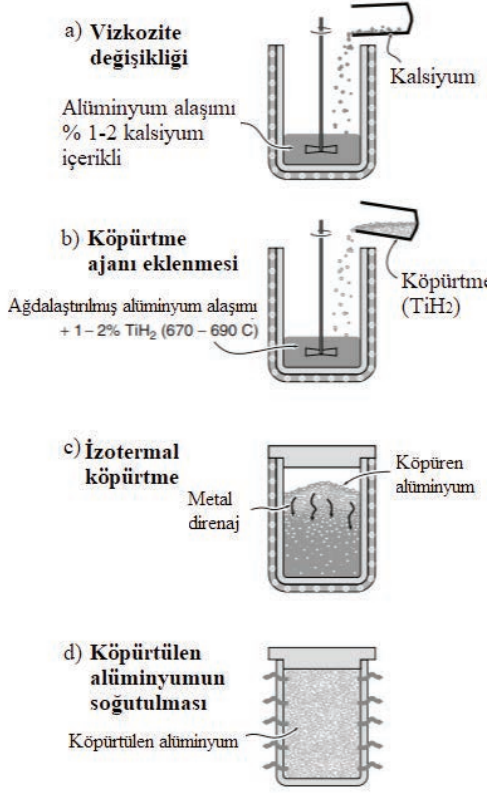


Şekil 2: Metal gaz enjeksiyonu ile üretim [9].

Bu yöntem ile 1 m uzunlukta 0,2 m genişlikte ve 5-20 mm kalınlıkta kapalı hücre gözenekli levhalar, üretmek mümkündür. Cymbat-Alcan ve Norsk-Hydro metalik köpükleri bu yöntem ile üretilir. En ekonomik yöntemdir ve 0,03 ten 0,1'e kadar rölatif yoğunlukta metalik köpükler üretmeye imkan tanır [5].

2.2. Ergiyik Metal İçerisine Köpürtücü Madde İlavesi İle Metalik Köpük Üretimi

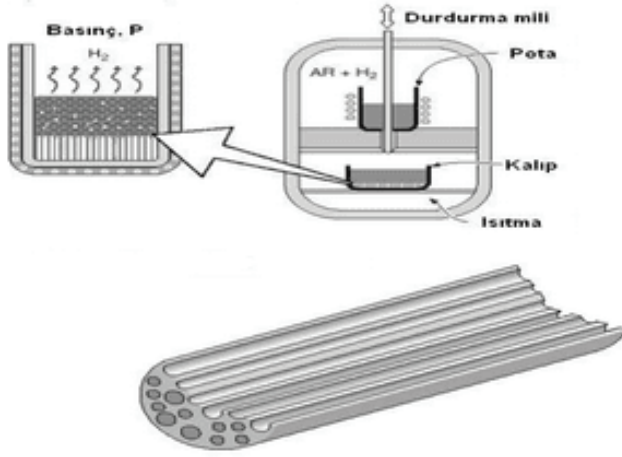
Ergiyiği köpürtmenin diğer bir yolu ergiyiğin içine köpürtücü bir madde eklenmesidir. Isı, köpürtücü maddeleri ayrıştırarak gaz çıkmasına neden olur ve köpürme işlemi başlar. Şekil 3'de gösterilen bu süreçte öncelikle alüminyum eriyiğinin sıcaklığı 670-690 °C arasında sabitlenir. Daha sonra %1-2 oranında kalsiyum ilave edilerek viskozitesi artırılır. Kalsiyum oksitlenerek CaO_2 , CaAl_2O_4 , Al_2Ca inter metaliklerini meydana getirir. Bu inter metalikler viskozitenin kararlı bir şekilde artmasını sağlar. Viskozite istenilen değere geldiğinde %1,6 oranında titanyum hidrür (TiH_2) ilave edilerek hidrojen gazı açığa çıkması sağlanır. Sonrasında ergiyik yavaş yavaş genişerek köpürme kabını doldurmaya başlar. Köpürme sabit basınç altında meydana gelir. Köpüren alaşım alüminyumun ergime sıcaklığının altına düşüğünde metalik köpük elde edilir [4,5,6].



Şekil 3: Ergiyik içerisinde gaz açığa çıkaran partikül ayrışması (Alporas prosesi) [9]

2.3. Katı-Gaz Ötektik Katılaşma (Gasar)

Bu yöntem son yıllarda geliştirilen yeni bir yöntemdir. Al, Ce, Be, Fe, Cu, Mg, Ni ve Mn alaşımları, 50 ATM basınç altında hidrojen atmosferinde ergitilerek hidrojenle yüklü homojen bir ergiyik oluşturulur. Sıcaklığın düşürülmesi halinde ergiyik çift fazlı bir sisteme (katı-gaz) ötektik bir geçiş yapar. Ergiyik katılaştıkça gaz gözenekleri çöker ve metalde yakalanır. Sonuçta hidrojen dolgululu gözenekleri olan bir yapı meydana gelir. Bu malzemeler GASAR olarak adlandırılır. %30 gözenek hacminde metalik köpükler üretilebilir. Gözenek yapısının optimizasyon ve kontrolü zordur. Bu yöntem diğer yöntemlere göre daha maliyetlidir [4,6], (Şekil.4).



Şekil 4: Gaz-metal ötektik katılaştırma [9].

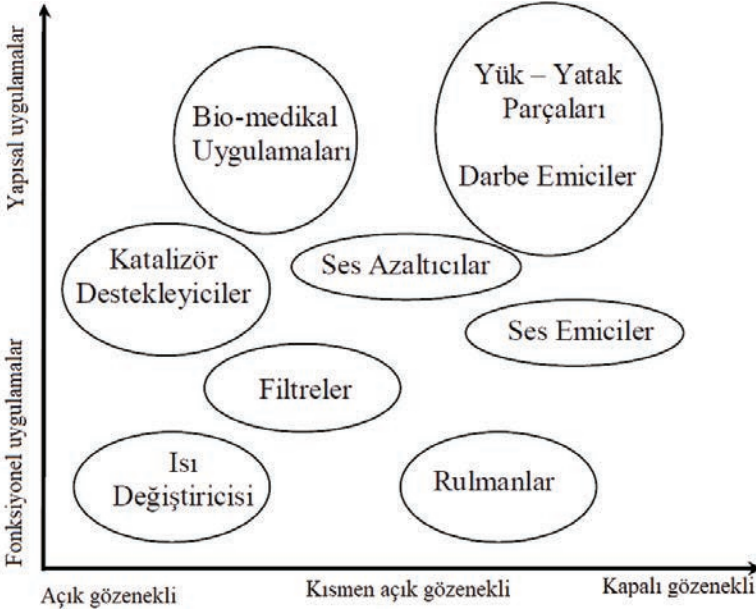
2.4. Toz Metalürjisi ile Köpürtme (Foaminal/Alulight)

Bu yöntemde işlemler öncelikle köpürtücü bir madde ile metal tozlarının karıştırılmasıyla başlamaktadır. Sonrasında kompaktlama yapılır. Kompaktlamada izostatik sıkıştırma çubuk ekstrüzyon veya toz haddeleme tercih edilebilir. Kompaktlamanın düzgün yapılması önemlidir çünkü burada oluşacak kusurlar ileriki aşamalarda kötü sonuçlara yol açabilmektedir. Prosesin devamında matrise ergime noktasına yakın sıcaklıklarda ısıl işlem yapılmaktadır. Metal matris içerisinde homojen şekilde gömülü bulunan köpürtücü maddeler ayrışır ve metal matris içerisinde eriyerek matris içerisine gaz salınımı yapar ve gözenekli bir yapı oluşturur [4,6].

Prosesin tamamlanması için gerekli zaman sıcaklık ve malzemenin miktarına göre birkaç saniyeden birkaç dakikaya kadar sürebilmektedir. Bu yöntem çinko, kalay, altın, kurşun gibi birçok metale uygulanabilmektedir [4,6].

3. Metalik Köpüklerin Kullanım Alanları

Metalik köpükler kendilerine özgü özellikleri sayesinde endüstrinin birçok kolunda geniş kullanım alanları bulmaktadırlar. Kullanım alanları köpüklerin açık veya kapalılık durumuna göre farklılık göstermektedir. Kullanım alanlarını yapısal ve fonksiyonel olarak başlıca iki guruba ayıracak olursak bunların gözenek türüne göre gösterimi Şekil 5'deki gibidir [7].



Şekil 5: Metalik köpüklerdeki gözenek türünün kullanım alanlarına yönelik gösterimi[7].

3.1. Metalik Köpüklerin Yapısal Uygulamaları

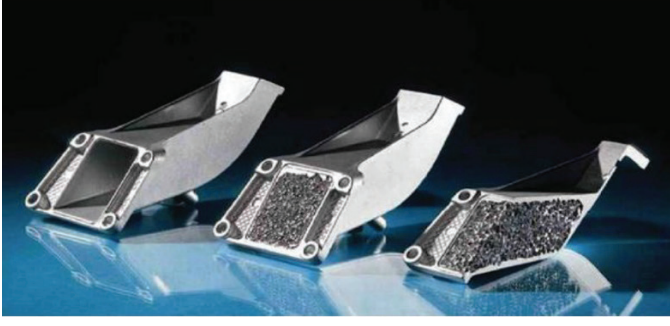
Otomotiv Endüstrisi

Otomotiv endüstrisinde metalik köpükler başlıca üç alanda kullanılmaktadır. Bunlar; yapının hafifletilmesi, enerji emilimi ve sönümlemedir.

Araçlarda hafifliğin yanında sağlamlığı da arttırmak için metalik köpükler sandviç paneller ile birlikte kullanılmaktadır. Bu şekilde kullanıldıklarında çelik panellere kıyasla sekiz kat daha dayanıklı ve % 25 daha hafif bir yapı elde etmek mümkündür [7].

Otomotiv endüstrisinde sesin emilimi ve yalıtımı büyük önem arz etmektedir. Alüminyum köpükler ses emilimi ve yalıtımından dolayı burada ön plana çıkmaktadır. Örnek olarak viyadük altlarına monte edilen ALPORAS köpük metaller viyadüğün altından geçen araçların gürültülerini absorbe edebilmektedir [7].

Metalik köpüklerin otomotiv endüstrisindeki bir diğer kullanım alanı çarpışma emicilerdir. Otomotiv şirketleri yolcuları korumak ve araçtaki hasarı minimize etmek için birçok çalışma yapmıştır. Bu çalışmalar sonucunda metalik köpük içerikli çalışma kutuları keşfetmişlerdir. Bu kutuların kullanım amacı 15 km/saat'e kadar olan çarpışmalarda deforme olarak araçta oluşacak maddi hasarları önlemektedir. Bunlara örnek olarak LKR (Avusturya) ve BMW tarafından geliştirilen montaj bloğu Şekil 6'da görülmektedir [7].



Şekil 6: LKR ve BMW tarafından geliştirilmiş çarpışma emici [7].

Uzay ve Hava Endüstrisi

Metalik köpüklerin hafiflik/dayanım özelliğinin kullanımı otomotiv ve uzay-hava endüstrisinde benzerlik göstermektedir. Uzay ve havacılık endüstrisinde de metalik köpükler ucuz maliyet ile yüksek performans elde edilmek amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin Boeing firması alüminyum köpük içerikli alüminyum panelleri helikopter kuyruk çubuklarında kullanmaktadır. Ayrıca bazı uzay araçlarının iniş takımlarında iniş sırasında enerji emici çarpışma malzemesi olarak kullanımına yönelik çalışmalar mevcuttur.

Denizcilik endüstrisi

Hafif malzemeler denizcilik endüstrisinde başat rol oynamaktadır. Modern yolcu gemileri bütünüyle alüminyum içerikli malzemelerden oluşmaktadır. Metalik köpüklerin denizcilik uygulamalarından bazıları gemi bölmeleri, ambar platformları, fişek ambarları, anten platformlarıdır.

3.2. Metalik Köpüklerin Fonksiyonel Uygulamaları

Yüksek termal iletkenlik ve korozyon dayanımından dolayı açık gözenekli bakır ve alüminyum köpükler ısı değiştirici olarak kullanılmaktadır. Metalik köpüklerin diğer bir fonksiyonel uygulaması da su arıtıcılarıdır. Bu uygulamada su açık gözenekli metalik köpük içerisinden akıtılır. Bu sırada iyonlar ile metalik köpük yapısı redoks reaksiyonu oluşturur. Son olarak kompresör susturucularında ve filtrelerde metalik köpüklerin kullanımına yönelik uygulamalar mevcuttur (Şekil 7).



Şekil 7: Alüminyum köpüklü susturucular [7].

4. Metalik Köpüklerin Genel özellikleri

- Metalik köpükler yüksek sıcaklıklara dayanabilme ve yüksek sıcaklıklarda toksik gaz oluşturmama gibi özellikleri ile polimerik köpüklerden daha avantajlıdır.
- Geri dönüşümleri tamamen yapılabilmekte olduğu için çevrecilerdir.
- Ağırlıklarınının düşük olması önemli bir özellikleridir.
- Titreşim ve darbeleri yönden bağımsız olarak sönümlemesi olumlu özelliklerinden bir tanesidir.
- Özgül ısıları düşüktür bu özelliğin istendiği uygulamalarda önemli avantajlar sağlar.
- Isıl şoklara dayanımları normal malzemelere kıyasla daha yüksektir.
- Isıl iletimleri düşüktür [4].

5. Metalik Köpüklerin Mekanik Özellikleri

Metalik köpüklerin mekanik özellikleri üretildikleri malzemelerin mekanik özellikleri ile belirlenmektedir. Alüminyum alaşımından meydana gelen bir metalik köpük ile nikel veya titanyumdan meydana bir metalik köpüğün mekanik özellikleri farklılık göstermektedir. Aynı malzemeden üretilen metalik köpüklerde ise bağıl yoğunluk mekanik özelliklerde belirleyici rol oynar. Bağıl yoğunluk metal köpüğün yoğunluğunun köpüğün üretildiği matris malzemenin yoğunluğuna oranını ifade etmektedir. Mekanik dayanımla bağıl yoğunluk arasında doğrusal bir bağıntı vardır [8].

Basma yükleri altında kapalı gözenekli metalik köpüklerde akma gerilmesinden sonra açık gözeneklilere kıyasla birim uzama ile yavaşça artan gerilmeler görülmektedir. Bu artışın nedeni kapalı gözenekli köpüklerde hücre duvarlarını birleştiren yüzeylerin ezilme esnasında kuvvet taşınmasıdır. Açık gözenekli metalik köpüklerde olmayan bu yüzeylerden dolayı kapalı gözenekli köpük malzemelerin basma yükü altındaki dayanım değerleri açık gözeneklilere kıyasla daha yüksek çıkmaktadır [8,9].

Metalik köpüklerdeki bazı hücre geometrileri idealize edilerek köpüklerin üretildiği malzeme, köpüğün yoğunluğu ve hücresel yapının tipi ile mekanik özellikler arasında bazı ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Gibson ve Ashby'in geliştirdiği bağıntılardan ilki köpük yoğunluğu ile elastik modül arasında kübik bir köpük yapısına uyguladıkları bağıntılar [8,10];

$$\frac{E}{E_m} \approx \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right)^2 \rightarrow E = (0,1 - 4)E_m \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right)^2$$

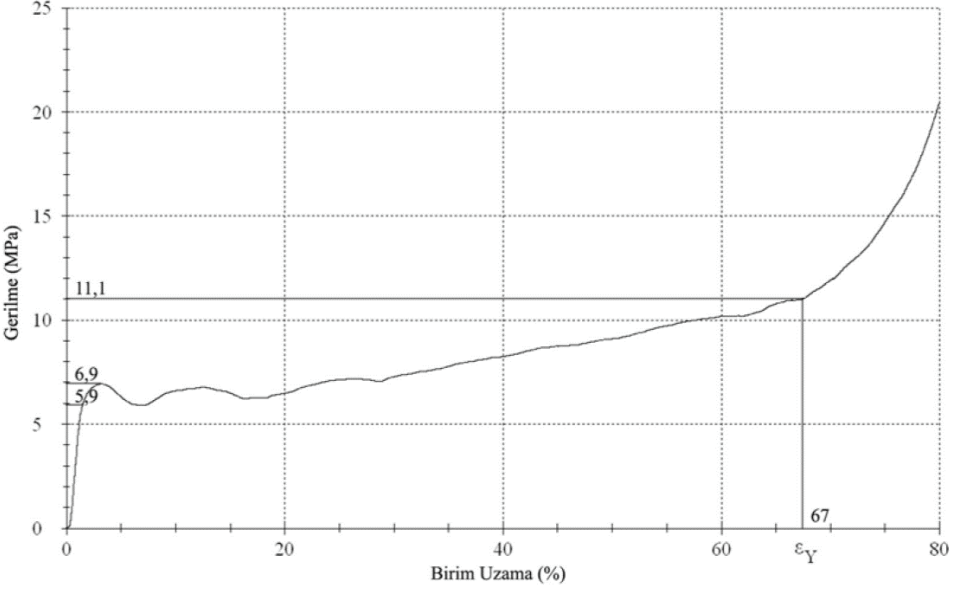
$$\frac{E}{E_m} \approx \varphi^2 \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right) + (1 - \varphi) \rightarrow E = (0,1 - 1,0)E_m \times \left[0,5 \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right)^2 + 0,3 \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right)\right]$$

Burada; E_m = köpüğün üretildiği matrisin elastisite modülü ve yoğunluğunu,

φ = indisi kapalı gözenekli köpüklerde hücre duvarlarında bulunan malzeme oranını,

ifade etmektedir. Bu bağıntılar açık gözenekli köpüklerde hasar mekanizmalarının hücre kenarlarının eğilmesiyle kapalı gözenekli köpüklerde ise hücre duvarlarının gerilmeye uğradığı durumlarda geçerlidir. İkinci bağıntıda ki katsayılar yapılan basma deneyleri sonucunda eğri uydurularak bulunmuş değerlerdir. Bu bağıntılar ile piyasadaki çoğu metalik köpük için elastisite modülü bağıl yoğunluk hesabı yapılabilmektedir [8].

Metalik köpükler bası kuvvetleri etkisindeki karakteristik özellikleri akma noktasına kadar lineere yakın bir gerilme artışı, sonrasında ise şekil değiştirme bölgesi boyunca sabit devam eden ya da artan gerilme değeri ve son bölgede birim şekil değiştirmesinin aşılmasıyla hızla artan gerilme değeri şeklindedir. Gerilmenin az değiştiği akma gerilmesi (σ_k) değerinden yoğunlaşmanın başladığı şekil değiştirmeye denk gelen gerilme değeri plato bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölge boşluklu yapının çökmesiyle sonlanır (ϵ_Y) daha sonra gerilmeye hızlı bir artış meydana gelir [8].



Şekil 8: 6061 serisi alüminyum alaşımına ait bir köpüğün ezilme davranışını gösteren bası-uzama grafiği [8].

Akma gerilmesinden yoğunlaşma uzamasına kadar devam eden plato bölgesinde az bir değişim gösteren gerilme değerine plato gerilmesi (σ_{pl}) denilmektedir (Şekil. 8). σ_{pl} ve ϵ_Y değerleri ve bağıl yoğunluk arasındaki ilişkiyi Ashby ve Gibson kapalı gözenekli köpüklere aşağıdaki gibi tanımlamışlardır [8, 9];

$$\sigma_{pl} \approx (0,25 - 0,35 \text{ arası}) \sigma_{ak,m} \left(\frac{\rho}{\rho_m} \right)^n \text{ (MPa)}$$

$$\epsilon_Y \approx \left(1 - \alpha_1 \frac{\rho}{\rho_m} \right)$$

σ_{ak} = akma dayanımı, ρ_m = köpüğü oluşturan malzemenin yoğunluğu, ρ = köpüğün yoğunluğu.

Metalik köpüklerde n ; 1,5-2 arasında, α_1 ise 1,4-2 arasında değerler almaktadır. Bu değerler enerji emme uygulamalarında büyük önem arz etmektedir.

Kaynaklar

- [1] Şahinoğlu, A., O., (2019). Metalik Köpükler, Bilim Teknik, 65-69.
- [2] Doğan, A., Atmaca, İ., Özbalcı, O., (2015). Metal köpük malzemeler ve yüzey soğutmada kullanımı. 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 2641-2652, İzmir.
- [3] Güven, Ş.Y., (2011). Toz metalürjisi ve metalik köpükler. Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, 1 (2), 22-28.
- [4] Ozan, S., Kat, N., (2011). Metal köpükler. 6th International Advanced Technologies Symposium, 317-320.
- [5] <https://www.muhenisul.com/2017/05/06/metal-aluminyum-kopuk-uretim-yontemleri/>
- [6] Banhart J., (2000). Manufacturing Routes for Metallic Foams, JOM, 52(12), 22-27.
- [7] Yavuz, İ., (2010). Metalik köpük malzemeler ve uygulama alanları. Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED) 2(1), 49-58.
- [8] Yazıcıoğlu, M., Uçak, T., Altıntaş, S., (2007). Alüminyum köpüklerin mekanik özellikleri, XV. Ulusal Mekanik Kongresi, 595-604.
- [9] Ashby, M.F., A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, (2000). Metal Foams: A Design Guide, Butterworth Heineman,.
- [10] Gibson, L.J., M.F. Ashby, (1999). Cellular Solids-Structure and properties, Cambridge University Press.

Bölüm 18

Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMINA UYGULANAN BORLAMA İŞLEMLERİNİN İNCELENMESİ

*İlyas TÜRKMEN¹
Oktay ASLAN²*

1 Arş. Gör. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, ilyas.turkmen@cbu.edu.tr

2 Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, oktayaslan0909@gmail.com

1. TİTANYUM

1.1. Tanımı, Özellikleri ve Tarihçesi

Titanyum (Ti); atom numarası 22, atom ağırlığı 47,87 olan ve periyodik tablonun 4B grubunda bulunan bir geçiş elementidir. Titanyum fiziksel olarak çok sert, beyaz-gümüş renktedir. Özgül ağırlığı $4,50 \text{ g cm}^{-3}$ olan titanyumun ergime sıcaklığı $1668 \text{ }^\circ\text{C}$, kaynama noktası ise $3287 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir [1]. Isı ve elektrik iletkenliği demire göre düşük olan titanyumun ısıl iletkenlik katsayısı $0,219 \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve özgül ısısı $0,520 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 'dir [2,3]. Doğada saf halde bulunmayan titanyumun oksijene karşı afinitesi yüksektir ve litofil elementler arasında yer almaktadır [3]. Titanyum yerkabuğunda alüminyum (Al), demir (Fe) ve magnezyumdan (Mg) sonra en çok bulunan 4. metaldir ve element olarak yerkabuğunun binde altısını oluşturmaktadır. Titanyumun en önemli mineral kaynakları rutil (TiO_2) ve ilmenit (FeTiO_3)'dir [4]. Titanyum; hafifliği, mukavemeti ve korozyona karşı direnci gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır [3].

Mineral bilimci William Gregor, 1791 yılında Madagaskar'da bulunan Manakara bölgesi yakınlarında çalışmakta olduğu sırada ne olduğunu belirleyemediği bir mineral olan ilmeniti (FeTiO_3) incelemiş ve aslında titanyumu bulmuştur. William Gregor, Manakara şehrinin adından esinlenerek bu minerale "Menakirit" adını vermiştir [5]. 1795 yılında Alman kimyacı Martin Heinrich Klaproth rutilin (TiO_2) analizini yaparak bu oksidin yeni bir element içerdiğini tespit etmiştir [4]. Martin Heinrich Klaproth yunan mitolojisinde toprağın ilk oğullarının isimleri olan Titans'dan esinlenerek bu elemente "Titanyum" adını vermiştir [6]. 1910 yılında saf metalik titanyum (%99,9), ilk olarak Matthew A. Hunter tarafından titanyum tetraklorür (TiCl_4) ile sodyumun (Na) $700\text{-}800 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa ısıtılmasıyla elde edilmiştir. 1932 senesinde Wilhelm Justin Kroll, TiCl_4 ile kalsiyumu (Ca) birleştirerek yüksek kalitede saf titanyumu üretmeyi başarmıştır [1]. Titanyumun saf olarak elde edilmesi azota ve oksijene olan ilgisinden dolayı yüksek bir teknoloji gerektirmiştir. Bu problem Dr. Kroll'un 1938-1940 yılları arasında geliştirdiği Kroll yöntemi adı verilen işlemlerle tam anlamıyla çözülebilmıştır. Bu yöntem, TiCl_4 'ün koruyucu atmosfer ortamında magnezyumla indirgenmesine dayanmaktadır. Kroll yöntemiyle üretilen titanyumun şekli sünger gibi gözenekli bir yapıda olduğundan bu titanyuma "titanyum süngeri" de denmektedir [7]. Kroll prosesi günümüzde de titanyumun üretimi için etkili bir proses olarak kullanılmaktadır [1].

1.2. Titanyumun Kimyasal, Mekanik, Biyolojik ve Diğer Üstün Özellikleri

Titanyumun en önemli kimyasal özelliği üstün korozyon direncidir. Korozyona karşı direnci yüzey kısmında oluşan koruyucu pasif oksit ta-

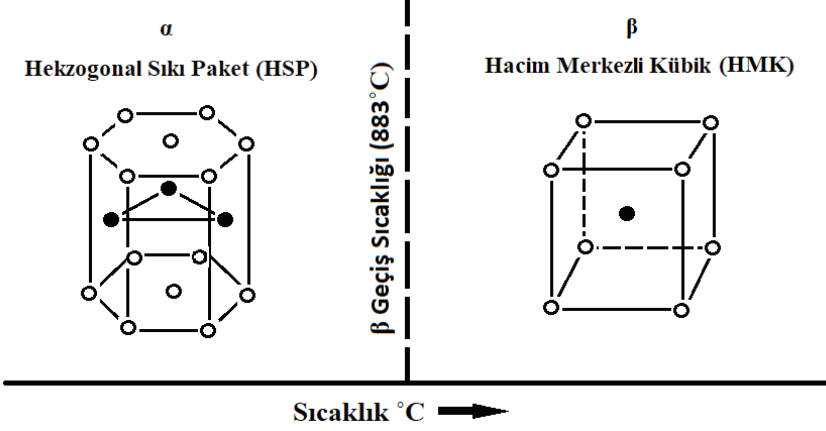
bakasından (TiO_2) kaynaklanmaktadır [8]. Titanyum platine yakın bir korozyon direncine sahip olup; klor gazına (Cl_2), tuz çözeltilerine ve pek çok aside karşı dirençlidir [9]. Titanyum, yaklaşık olarak $535\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. Fakat $535\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üstündeki sıcaklıklarda yüzeydeki koruyucu tabaka parçalanmakta ve C, H ve N atomları malzemeyi kırılganlaştırmaktadır [1].

Titanyum düşük yoğunluğa ve yüksek dayanıma sahip bir metaldir. Metalik bir element olan titanyumun diğer metalik malzemelerden üstün olan en önemli özelliği spesifik (özgül) mukavemet (dayanım) değeridir [4]. Örneğin titanyumun çekme dayanımı yaklaşık olarak 434 MPa olup bu değer birçok çeliğin çekme dayanımıyla aynıdır. Fakat çeliğe göre titanyum %45 daha hafif bir malzemedir. Titanyumun özgül dayanım değeri alüminyumla kıyaslandığında ise titanyumun ağırlığı alüminyumun ağırlığından %60 daha fazla olmasına rağmen en çok kullanılan alüminyum alaşımlarından biri olan 6061-T6 malzemesinden 2 kat daha yüksek mukavemete sahip olduğu ifade edilmektedir [9]. Titanyum ısıtma işlemi uygulanmış bazı çelik türleri kadar olmasa da paramanyetik bir malzemedir. Ayrıca titanyumun ısıtma iletkenliği çeliklerden düşüktür [9].

Doku cevabının iyi oluşu, toksik olmaması ve alerjik reaksiyonlara yol açmaması nedeniyle titanyum biyoyumlu bir malzeme olarak ifade edilmektedir. Titanyum herhangi bir forma (kütük, yuvarlak, altıgen, yassı, çubuk, levha, tel vb.) kolayca getirilebilir ve kolayca kaynaklama işlemine tabi tutulabilir. Ek olarak titanyum yangına ve darbelere karşı da dayanıklıdır [6].

1.3. Titanyumun Faz Yapısı

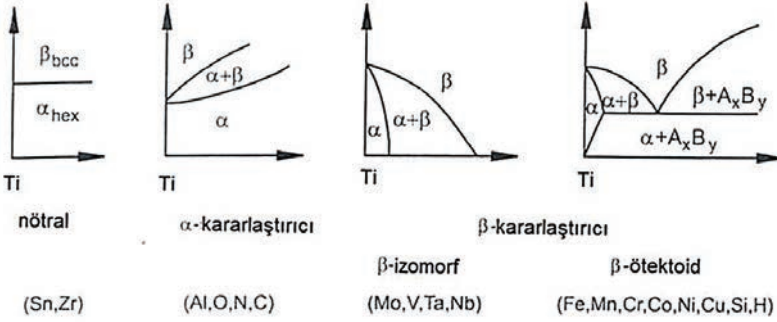
Titanyum allotropik karakterde bir malzeme olup, $883\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar alfa (α) fazı olarak ifade edilen hegzogonal sıkı paket (HSP) kristal kafes yapısına sahiptir. Saf titanyum için yaklaşık $883\text{ }^\circ\text{C}$ ve üzerindeki sıcaklıklarda HSP (Hekzogonal Sıkı Paket) kristal kafes yapısı; hacim merkezli kübik (HMK) yapıya (β faz yapısına) dönüşmektedir. Şekil 1'de HSP kristal kafes yapısına sahip alfa (α) ve HMK kristal yapısına sahip beta (β) fazlarının kristal kafes yapıları görülmektedir [10].



Şekil 1. HSP α ve HMK β fazlarının kristal yapısı [11].

Titanyum; alüminyum (Al), vanadyum (V) demir (Fe) ve molibden (Mo) gibi elementler ile alaşım yapabilen bir malzemedir [4]. Titanyumun faz yapısını etkileyen alaşım elementleri nötral, α kararlaştırıcı, β kararlaştırıcı olmak üzere üç gruba ayrılır. Şekil 2’de alaşım elementi ilavesinin titanyum faz diyagramına etkisi şematik olarak gösterilmiştir [4]. Alaşım elementlerinin eklenmesi dönüşüm sıcaklığını ikiye bölmektedir. Altındaki sıcaklıklarda tüm alaşımın α fazında olduğu sıcaklığa “ α dönüşüm sıcaklığı”; üzerindeki sıcaklıklarda tüm alaşımın β fazında olduğu sıcaklığa “ β dönüşüm sıcaklığı” denilmektedir. Bu iki dönüşüm sıcaklığı arasındaysa malzemenin mikro yapısında hem α hem de β fazı bulunmaktadır [12].

Nötral grupta bulunan zirkonyum (Zr) ve kalay (Sn) gibi elementler geçiş sıcaklığını etkilemeyerek hemen hemen nötr etki yapmaktadır. α kararlaştırıcı grupta yer alan alüminyum (Al), galyum (Ga), germanyum (Ge), karbon (C), oksijen (O) ve azot (N) gibi alaşım elementleri α - β dönüşüm sıcaklığını yükseltmekte ve titanyum kristal yapısındaki α fazını daha kararlı hale getirmektedir. α - β dönüşüm sıcaklığını düşürüp β fazını kararlı hale getiren ise iki grup element bulunmaktadır [12]. Bunlardan izomorf grup; β fazı içerisinde tamamen çözünebilen tantal (Ta), molibden (Mo), vanadyum (V) ve niyobyum (Nb) elementlerinden oluşmaktadır. Ötektoid grupsa; titanyumla ötektoid alaşımlar yapan elementlerdir ve ötektoid sıcaklıkları saf titanyumun dönüşüm sıcaklığının 333 °C kadar altındadır. Ötektoid grup; krom (Cr), nikel (Ni), demir (Fe), tungsten (W), silisyum (Si), bakır (Cu), mangan (Mn) ve kobalt (Co), gibi elementleri içermektedir. Bu elementler α fazında düşük çözünürlüğe sahiptir ve dönüşüm sıcaklığını düşürmektedir [2].



Şekil 2. Alaşım elementi ilavesinin titanyum faz diyagramına etkisinin şematik gösterimi [4].

1.4. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum ve titanyum alaşımları saf titanyum (%99-100 Ti), yapısında buldukları fazlara göre; alfa titanyum alaşımları (%90-95 Ti), alfa-beta titanyum alaşımları (%80-90 Ti) ve beta titanyum alaşımları (%80<Ti) olmak üzere başlıca 4 ana sınıfa ayrılmaktadır [10]. Alfa (α) alaşımının tüm yapısında α fazı bulunurken, β alaşımlarının yapısında yüksek oranda β fazı bulunmaktadır. $\alpha+\beta$ alaşımları ise oda sıcaklığında yapılarında hem α hem de β fazı bulundurmaktadır [7]. Titanyum üretiminin yaklaşık olarak %30'unu alaşımsız titanyum, % 45'ini Ti6Al4V gibi $\alpha+\beta$ alaşımı ve geri kalan % 25'ini ise diğer alaşımlar oluşturmaktadır [13]

Ticari safılıktaki titanyum (CP Ti), % 98,63-% 99,5 oranında titanyum ve içeriğinde az miktarda oksijen, demir, karbon, hidrojen ve azot elementlerinin yer aldığı çok seyreltik bir alaşımdır [14]. Ticari safılıktaki titanyum ürünler, özellikle yüksek dayanımın gerekmediği uygulamalarda; genelde yüksek korozyon dirençlerinden dolayı tercih edilmektedir [15].

Alfa (α) titanyum alaşımları genellikle ticari safılıktaki titanyum, α kararlaştırıcı ve/veya nötr elementlerle alaşımlandırılmış alaşımlardan oluşmaktadır [4]. Yapısında alüminyum (Al), kalay (Sn) ya da zirkonyum (Zr) bulunan alfa (α) alaşımları daha çok yüksek sıcaklık uygulamalarında veya çok düşük sıcaklık ortamlarında kullanılmaktadır [6]. Ayrıca α alaşımları yapısında eser miktarda ara yer atomu içerdiğinden, çok düşük sıcaklıklarda bile tokluğunu ve sünekliğini korumaktadır [16]. α titanyum alaşımları çok yüksek korozyon dayanımı ve deformasyon kabiliyetine sahiptir. Bu üstün özellikleri sayesinde en çok kimya sanayinde kullanılmaktadır [17]. α titanyum alaşımlarının piyasada en fazla tercih edilen türleri CP-Ti ve Ti5Al2,5Sn'dir [18].

Alfa-Beta ($\alpha+\beta$) titanyum alaşımları hem α fazını hem de β fazını kararlı hale getiren elementler (Al, Cr, V ve Mo) ile α veya β fazı içerisinde

çözünebilen bir ya da daha fazla elementi yapısında bulunduran alaşımlardır. $\alpha+\beta$ titanyum alaşımları yüksek korozyon direnci, yüksek yorulma ve çekme dayanımı, iyi sıcak şekillendirme ve yüksek sürünme direncine sahiptir [1]. Özellikle $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarına tavlama işlemi uygulanması neticesinde yüksek süneklik, homojenlik ve yüksek dayanım sağlanmaktadır. Düşük yoğunluklu bu yapıdaki malzemeler mukavemet ve korozyona karşı dayanıklılık fonksiyonlarını yüksek sıcaklıklara kadar korurlar [19].

Ti6Al4V alaşımı; titanyum alaşımları içerisinde en fazla tercih edilen $\alpha+\beta$ titanyum alaşımı olup 1950'li yıllarda bulunmuş ilk titanyum alaşımlarındandır. Mikro yapısında $\alpha+\beta$ fazının eşit dağılmasından dolayı özelliklerinin iyi olması sebebiyle en sık kullanılan titanyum malzemeler arasında yer almaktadır. Ti6Al4V alaşımı özellikle havacılık sanayinde en çok test edilmiş, uygulanmış ve geliştirilmiş titanyum alaşımıdır [18]. Ti-6Al6V2Sn alaşımı yüksek mukavemet, Ti6Al2Sn4Zr6Mo alaşımı yüksek mukavemet ve tokluk gibi özellikleri sayesinde gaz türbinleri başta olmak üzere birçok alanda kullanılan diğer $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarına örnek olarak verilebilir [6].

Beta-titanyum alaşımları, kararsız alaşımlar olduklarından α fazının; β matrisi içerisinde çökeltilmesi ile β alaşımlarının sertleştirilmesi gerçekleştirilmekte ve β geçiş sıcaklığından hızla soğutulduğunda β fazını koruyan β dengeleyici elementlerin katkısıyla oluşmaktadır. Çok sayıda alaşım elementi β -dengeleyici element olmasına rağmen sadece V, Mo, Fe, Nb ve Cr önemli miktarlarda (ağırlıkça %10-20) kullanılmaktadır [13]. β titanyum alaşımlarının sertleştirilebilme kabiliyetleri yüksektir. β alaşımları yüksek tokluk, bazı alaşımlarda soğuk şekillendirilebilme ve yüksek korozyon direnci, kolay ısıl işlem ve yüksek mukavemet gibi üstün özelliklere sahip olmasına rağmen; bazı alaşımlarda düşük korozyon direnci, çok düşük ve yüksek sıcaklıklarda zayıf özellikler sergilemesi, yüksek yoğunluk ve segregasyon sorunları gibi dezavantajları da bulunmaktadır [17]. β titanyum alaşımlarına Ti10V2Fe3Al, Ti15V3Cr3Al3Sn, Ti3Al8V6Cr4Mo4Zr alaşımları örnek olarak gösterilebilir [18]. Tablo 1'de α , $\alpha + \beta$ ve β alaşımlarının genel özelliklerinin kıyaslanması gösterilmiştir [1].

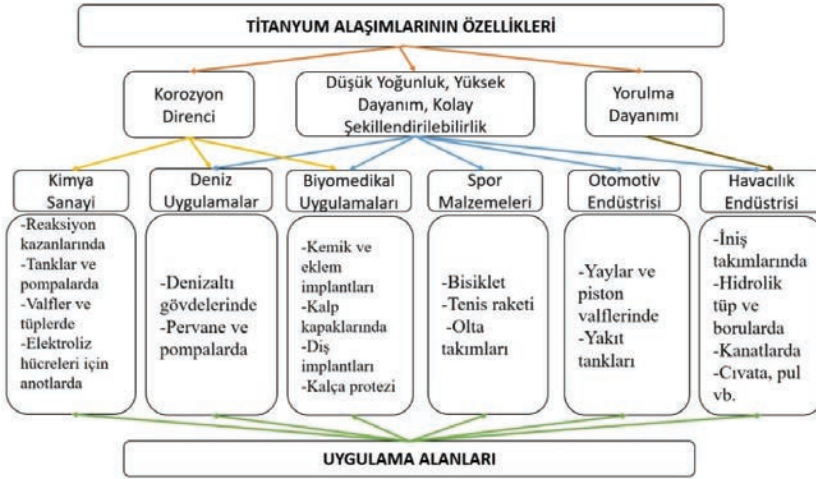
Tablo 1. α , $\alpha + \beta$ ve β alaşımlarının genel özelliklerinin karşılaştırılması [1].

Özellik	α Titanyum	$\alpha + \beta$ Titanyum	β Titanyum
Yoğunluk	Düşük	Düşük	Yüksek
Mukavemet	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Korozyon Direnci	Yüksek	Yüksek	Düşük/ Yüksek
Süneklik	Düşük/ Yüksek	Yüksek	Düşük/ Yüksek
Tokluk	Yüksek	Düşük/ Yüksek	Düşük/ Yüksek

Sürünme	Yüksek	Düşük/ Yüksek	Düşük
Oksidasyon Davranışı	Çok Yüksek	Düşük/ Yüksek	Düşük
Soğuk Şekillendirilebilirlik	Çok Düşük	Düşük	Düşük/ Yüksek
Kaynak kabiliyeti	Çok Yüksek	Düşük/ Yüksek	Düşük

1.5. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Titanyum elementi günümüzde her ne kadar yer kabuğunda en çok bulunan elementler arasında yer alsada da yarı mamul ürünlerinin maliyeti yüksek bir malzemedir. Bu durumun sebebi titanyumun yarı mamul çıkarılma ve ayırma sırasında karmaşık işlemlere duyulan gereksinim, tesis yatırımlarının yüksek maliyetli olması ve diğer yaygın kullanıma sahip metaller gibi kesintisiz üretim yöntemine sahip olmayışından kaynaklanmaktadır [4,6]. Yine de diğer metallerin sunamadığı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olduğu için özel uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Titanyum ve alaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı kimya sanayi, savunma sanayi, deniz sanayi, biyomedikal, havacılık ve uzay uygulamaları gibi özel kullanım alanlarında bir hayli güvenilir, ekonomik ve üstün olduğu teknik açıdan ispatlanmıştır. Şekil 3’de titanyum alaşımlarının farklı özelliklerine bağlı olarak değişen kullanım alanları verilmiştir [10,20].



Şekil 3. Titanyum alaşımlarının bazı özelliklerine bağlı olarak değişen uygulama alanları [10,20].

Biyomalzemeler için en önemli kriter biyoyumluluk olup, biyomalzemeler dokuda istenmeyen tepkiler (iltihaplanma, pıhtı vb.) oluşturmayan ve kendisini çevreleyen dokuların normal değişimlerine engel olmayan malzemelerdir [17]. Titanyum ve titanyum alaşımları metalik biyomalzemelerden olup, yüzey kısmında oluşan kararlı oksit tabakasının fizyolojik

sıvıyı, proteini, sert ve yumuşak dokuyu iyi kavramasından dolayı kemikle bağlanması iyi olan ve doku tarafından kabul edilirliliği yüksek olan biyomalzemelerdir [21]. Titanyum ve alaşımları uzun süreli implantasyonda iyi biyouyumluluğa sahiptirler ve enjekte edilen maddelerle birlikte kimyasal tepkimeye girme ihtimalleri azdır. Titanyum ve alaşımlarının özellikle biyomedikal uygulamalarda sıklıkla kullanılmasının bir başka nedeni ise insan vücudunda bulunan sıvının pH değeri 7,4' tür. Titanyum alaşımları bu pH değerinden etkilenmedikleri için insan vücuduna adaptasyon bakımından en uygun metaller arasındadır [17]. Titanyum ve alaşımlarının yüksek korozyona dayanımı, yoğunluğunun düşük olması, mekanik dayanımının biyomedikal uygulamalar için yeterli oluşu, manyetik olmadığından dolayı manyetik rezonans için uyumlu oluşu, hipoalerjik bir malzeme oluşu, elastiklik modülü diğer implant malzemelerine kıyasla kemiğe daha yakın olması gibi bir çok özelliği sayesinde biyomedikal uygulamalarda kullanımı uygun bulunan ve araştırma konusu olan bir malzemedir [17]. Bugün titanyum ve alaşımları bu özellikleri sayesinde damar stentleri ve bağlayıcıları, cerrahi splint, dental implant, protez eklem, kuron köprü, kalça protezi, ve parsiyel protez yapımı gibi biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır [21]. Ancak titanyumun temas ve sürtünme durumunda şiddetli aşınmaya uğraması, zayıf kayma mukavemeti, kemik erimesinden dolayı implant gevşemesi ve ağrı ile sonuçlanan aşınma partiküllerinin oluşumuna sebep olan yüksek sürtünme katsayısı gibi bir takım negatif durumlar nedeniyle kullanımı sınırlanmaktadır. [22].

Titanyum ve alaşımları düşük yoğunluğu, çalışma sıcaklığı, korozyon direnci, polimer matrisli kompozitler ile galvanik uyumlu olmaları gibi üstün özellikleri sayesinde havacılık uygulamalarında da kullanılmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının en büyük dezavantajı yüksek maliyetidir. Fakat taşımacılık alanında her bir kilogram hafiflik başına değişik miktarlarda maliyet artışı tolere edilmektedir. Örneğin otomobil sektöründe aracın ağırlığındaki bir kilogramlık hafifletme için 15 dolarlık bir maliyet kabul edilebilirken, havacılık sektöründe bu rakam 1500 dolara ve ileri teknoloji gerektiren uzay endüstrisindeyse bu rakam 15000 dolara kadar çıkmaktadır. Bu durum titanyumun diğer üstün özellikleri dışında sadece düşük yoğunluğu sayesinde bile kendisine havacılık sektöründe önemli ve yaygın olarak kullanım fırsatı sunmakta olduğunu açıklayan güzel bir örnektir [17,21]. Titanyum ve titanyum alaşımları havacılık sektöründe uçakların birçok kısmında yüksek mukavemet, korozyon direnci ve kullanım ömrü gibi özellikleri sayesinde kullanılmaktadır. Örneğin uçakların iç kesimlerindeki yaşamsal alanda korozyon direnci çok önemli olduğu için bu kısımlarda saf titanyum kullanılmaktadır. Benzer bir başka örnek verecek olursak uçakların iniş takımları eskiden yüksek mukavemetli çeliklerden imal edilmekteydi fakat gerilmeli korozyon nedeniyle iniş takımları sıkça değiştirilmek zorunda kalınıyordu. Günümüzde korozyon direnci sayesinde

de daha uzun ömürlü iniş takımları imal edebilmek için dövme titanyum alaşımları tercih edilmektedir. Titanyum ve titanyum alaşımlarının çalışma sıcaklığı ve hacimsel oranları dikkate alındığında ise uçak motorlarında % 33-38 oranında titanyum kullanıldığı görülmektedir [17].

2. BORLAMA

Malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenerek uygulanan çok sayıda teknik bulunmaktadır. Genel itibariyle bu metotlar iki temel noktaya dayanmaktadır;

I. Arayer katı çözeltisi meydana getirmek için küçük atomların yüzeye yayınımlı,

II. Yüzeye yayınımlı atomların altlık (ana) malzeme ile kimyasal tepkileşimi sonucunda yüzeyde yeni yapıların (bileşiklerin) oluşmasıdır [23].

Borlama, bir iş parçasının yüzeyinde metal borürler oluşturmak suretiyle korozyon direnci, yüzey sertliği ve aşınma direnci gibi mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi için uygulanan difüzyon esaslı bir yüzey işlemidir. Borlama titanyum, vanadyum, tantalyum, niyobyum, tungsten, krom, nikel gibi metallere ve alaşımlarına, demir esaslı malzemelere ve intermetalik malzemelere uygulanabilir [24,25]

Borlama işlemi, geliştirilen birçok farklı yöntemle uygulanabilmektedir. Bunlar, termokimyasal ve termokimyasal olmayan metotlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Termokimyasal metotlar, kutu (katı), sıvı, pasta ve gaz borlama uygulamalarıdır. Ayrıca teknolojik gelişmelerle termokimyasal borlama yöntemlerine akışkan yatakta borlama ve plazma borlama gibi yeni yöntemler de eklenmiştir. Termokimyasal olmayan yöntemler ise; kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD), iyon biriktirme ve plazma sprey gibi yöntemlerdir. Belirtilen bu yöntemler arasında en fazla tercih edilen yöntemler termokimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal borlama prosesleri, sıcaklık ve zamana bağlı olarak bor atomunun metal yüzeyine yayınımlıya dayanan yüzey işlemleridir. Termokimyasal olmayan yöntemlerle ise borür tabakası bir altlık malzeme üzerine biriktirilerek kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir.[24,26].

Genellikle borlama işlemi; yüzey temizliği iyi yapılmış malzemelerin, 800 °C ile 1100 °C aralığındaki yüksek sıcaklıklarda, genellikle 1 ile 12 saat aralığında kutu (katı), pasta (macun), sıvı ve gaz fazında ki bor verici ortamlarda bekletilmesiyle gerçekleştirilmektedir [24]. Farklı malzemeler için sıcaklık ve zaman gibi parametreler değişkenlik gösterebilmektedir. Borlama işlemi yapılırken çeşitli borlama karışımları kullanılabilir. Borlama karışımı genellikle üç temel bileşenden oluşmaktadır: Bunlar, (i) Bor kaynağı (B_4C , Fe-B (ferroalaşım), amorf elementel bor, H_2B_6), (ii)

Aktivatör (NaBF_4 , KBF_4 , $(\text{NH}_4)_3(\text{BF}_4)$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) ve (iii) Dolgu malzemesi (seyreltici) olarak (SiC , Al_2O_3) ifade edilmektedir [25,27]. Bor kaynağı, borür tabakasının oluşması için borlama ortamına gerekli bor elementini sağlamaktadır. Aktivatör, malzemenin yüzeyinde ilk borür çekirdeklerinin oluşmasında görev almaktadır. İlk borür çekirdeklerinin oluşmasından sonra borür tabakası aktivatörden bağımsız olarak gelişmekte ve büyümektedir. Serbest bor konsantrasyonun istenilen seviyede olması için seyreltici görevindeki kimyasalın borlama karışımında bulunması gerekmektedir. Sonuç olarak seyrelticiler bor miktarını kontrol etmekte ve akışkanlık sağlamaktadır [24].

Borlama işlemi sonucunda malzemenin yüzeyinde bir veya birden fazla faza sahip olan borür tabakası(ları) oluşmaktadır. Ek olarak, ana yapı (matris, çekirdek) ile borür tabakası arasında geçiş bölgesi adı verilen bir bölge oluşumu da gözlemlenebilmektedir [26]. Borür tabakasının kalınlığı ve morfolojisi altlık malzemenin kimyasal bileşimi ve miktarı, işlem sıcaklığı ve süresi, borlama yöntemi ve borlama karışımına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [26,28].

2.1. Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

Borlama İşleminin Avantajları

- Borlama işlemi sonucunda yüksek sertliğe (1400-5000 HV) ve yüksek ergime sıcaklığına (1400-1550°C) sahip borür tabakaları elde edilebilmektedir. Ayrıca bu tabaka yüksek sıcaklıklarda da sertliğini korumaktadır [29].
- Borlanmış malzeme yüzeylerinin düşük sürtünme katsayısı ve yüksek yüzey sertliğine sahip olmaları; yüzey yorulması, abrasiv aşınma ve kimyasal tribo-oksidasyon gibi temel aşınma mekanizmalarının meydana gelmesini engellemede çok ciddi yararlar sağlamaktadır [30].
- Demir esaslı malzemelerin, borlama işlemiyle oksitleyici olmayan seyreltik asitlere karşı erozyon dayanımını ve korozyon dayanımını artırmak mümkündür. Ayrıca, borlama işlemi korozif ve oksitleyici ortamlarda parçanın yorulma ömrünü de artırmaktadır.
- Yüksek sıcaklıklarda (850°C) borlanmış yüzeyler ergimiş metal korozyonu direncine ve oksidasyon direncine sahiptir.
- Borlama işlemi sürtünme katsayısını düşürerek soğuk kaynaklanma eğilimini ve yağlayıcı kullanımını azaltmaktadır [23,24,29–34].

Borlama İşleminin Dezavantajları

- Borlanan malzemelerde (borlama şartlarına ve borlanan malzemenin cinsine bağlı olarak) borür tabaka kalınlığının %5-20'si oranında

boyut artışı görülmektedir. Bu durum, boyutsal toleransın kritik olduğu durumlar için önemlidir.

- Genellikle borlama işlemi yapılmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (karbürleme ve nitrüleme işlemlerine tabi tutulan parçalara göre) çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği nedeniyle, dışı üretiminde sınırlama söz konusudur.

- Çok hassas toleranslarda çalışılması gerektiğinde, elmas takımlar ile kaplamanın işlenmesi mümkün olmaktadır. Çünkü geleneksel yöntemlerle yüzeyin işlenmesi kaplama tabakasında çatlamalara, kırılmalara ve bozulmalara sebep olmaktadır [24,25,31–34].

2.2. Borlama Yöntemleri

Katı (Kutu) Borlama Yöntemi

Kutu (katı) borlama prosesi; uygun bir kutu içerisinde borlanacak malzemenin borlama karışımıyla sarılarak belirli sıcaklık ve sürelerde bekletilmesiyle gerçekleştirilen termokimyasal borlama yöntemlerinden biridir [24]. Kutu borlama prosesi; genel olarak kutulama, ısıtma ve temizleme adımlarından oluşmaktadır [35]. Kutu borlama prosesi yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygun, oksidasyona karşı dayanıklı kutular (potalar) içerisinde gerçekleştirilmektedir. Borlama işlemi genellikle 700-1050 °C sıcaklıklarında 1-12 saat arasındaki işlem süreleri boyunca inert atmosfer ortamında yapılmaktadır. İstenilen borür tabakası kalınlığı ve morfolojisinin elde edilebilmesi için farklı işlem sıcaklıkları ve süreleri tercih edilebilmektedir [24]. Kutu borlama işleminde kullanılan borlama karışımları katı ve toz formdadır. Borlama karışımını bor kaynağı olarak bor karbür (B_4C), amorf bor (B) ve ferrobor (Fe-B); aktivatör olarak $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ ve seyreltici olarak SiC ve Al_2O_3 gibi bileşenler oluşturmaktadır [24,32,35,36]. Kutu borlama işleminin kolaylıkla uygulanabilmesi, fazla ekipmana ihtiyaç duyulmaması ve emniyetli olması nedeniyle sıklıkla tercih edilen bir borlama yöntemidir [35].

Pasta (Macun) Borlama Yöntemi

Kutu borlama işleminin uygulanamadığı büyük veya karmaşık şekilli komponentlerin kısmi ya da tamamen borlanması pasta borlama yöntemi ile daha kısa sürelerde ve daha ekonomik şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Borlama işleminde kullanılacak borlama bileşimini oluşturan tozlar macun formuna getirilerek parça üzerine püskürtülür ya da sürülerek uygulanmaktadır. Bu işlem ile parça üzerinde tabaka halinde yaklaşık 2 mm kalınlığında borlama karışımı oluşturulabilmektedir. Borlama karışımı olarak %45 B_4C ve %55 kriyolit'ten (Na_3AlF_6 flaks katkılı) oluşan bir karışım kullanılır ya da geleneksel borlama tozu karışımından (B_4C , SiC, KBF_4) oluşan karışıma bir

bağlayıcı (metil selülozun sulu çözeltisi, hidrolize edilmiş etil silikat ya da bütül asetatla çözülmüş nitroselüloz) ilave edilerek elde edilen karışım kullanılır. Borlama işlemi 800-1000 °C sıcaklıklarda ve 2-12 saat süreyle kontrollü bir atmosfer ortamında gerçekleştirilir. İşlem bittikten sonra malzeme dışarıya alınır ve soğumaya terk edilir. Son olarak, malzeme yüzeyindeki artık macun temizlenerek borlama işlemi tamamlanmış olur [24,29,35,37-39].

Sıvı Borlama Yöntemi

Bu borlama metodunda borlama banyosu sıvı haldedir. Borlanacak malzeme, 800-1000 °C sıcaklıktaki sıvı ortamda 2-6 saat tutularak bor difüzyonu gerçekleştirilir. Sıvı borlama uygulamalarında bor kaynağı olarak bor oksit, boraks, susuz boraks, bor karbür, metaborik asit gibi bor bileşikleri kullanılır [31]. Redükleyici olarak ise silisyum karbür, grafit, ferrosilisyum, sodyum klorür gibi malzemeler kullanılmaktadır [35,39,40]. Bor bileşiklerinin ya da sodyumklorür gibi eriticilerin miktarı gerektiğinde yüksek tutularak borlayıcı ortamın sıvı halde olması sağlanmaktadır [24]. Sıvı borlama işleminde kimyasal tepkimelerin sıvı ortamda daha hızlı gerçekleşmesinden kaynaklanan yüksek aktivite nedeniyle, sıvı borlama işlemi geniş kapsamda kullanılmaktadır. Sıvı borlama işlemi için koruyucu atmosfere gerek yoktur ve işlem atmosfer koşulları altında yapılabilir. Basitçe uygulanabilmesi, karmaşık teçhizatlar ihtiyacı olmaması ve kullanılan malzemelerin düşük maliyetli olması nedeniyle sıvı borlama işlemi tercih edilen bir borlama yöntemidir. Ancak bu yöntem akademik çalışmalarda laboratuvar şartlarında kolaylıkla uygulanabilmesine rağmen erimiş boraksın yüksek viskozitesi bu işlemin endüstriyel uygulamalarında sıcaklığın homojen olmasını zorlaştırmaktadır. Bu yüzden homojen olmayan borür tabakası kalınlıkları elde edilebilmektedir. Karmaşık ve büyük boyutlu komponentlere bu yöntem ile borlama işlemi yapılamamaktadır [24].

Gaz Borlama Yöntemi

Bu borlama yönteminde numuneler gaz fazındaki borlama ortamında borlanmaktadır. Borlama işlemi belirli gaz karışımlarının (Ar ve H₂ gazlarının ve bir evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının (BCl₃ gibi) belirli karışımının) dış ortama kapalı paslanmaz çelik malzemedeki yapılmış kutu içerisindeki numune üzerine püskürtülmesi yoluyla uygulanmaktadır. Gaz borlama işleminde, bor kaynağı olarak bor halojenürleri, bor hidrürler ve organik bor bileşikleri kullanılır. Gaz borlama prosesinde en çok BCl₃ gazı kullanılmaktadır [24,34]. BF₃, BCl₃, BBr₃, B₂O₃, (CH₃)₃B, (C₂H₅)₃B gazları gaz borlama işleminde kullanılan diğer çeşitli gazlara örnek olarak verilebilir [24,37]. Gaz borlayıcıların en önemli üstünlüğü, gaz sirkülasyonunun bir sonucu olarak daha kompakt bir bor dağılımının sağlanabilmesi ve elde edilmelerinin kolay olmasıdır. Genel olarak gaz ortamda borlama işleminde, bor potansiyelinin ayarlanabilmesi sebebiyle tek

fazlı bor tabakasını ortaya çıkarmak mümkündür [24,34]. Gaz borlama yönteminin en büyük dezavantajı sistem içerisinde kullanılan bazı gazlar (diboran bileşiği gibi) zehirlidir ve sistem içerisinde oluşan gazların patlama riski bulunmaktadır [24,35,41,42].

Plazma Borlama Yöntemi

Enerji vererek katı haldeki bir maddeyi sıvı hale, sıvı haldeki maddeyi gaz hale ve gaz halindeki maddeyi plazma haline getirmek mümkündür. Plazma; içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom ya da molekül içeren karışımdır. Uygulama açısından plazma, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile elde edilir. En çok kullanılan plazma yöntemi elektriksel boşalmadır [24,34,43]. Plazma borlama işlemi, redük-tan olarak argon (Ar) ve hidrojen (H_2) gazlarıyla birlikte temel bor kaynağı olarak B_2H_6 , BCl_3 , BF_3 veya trimetilborat [$B(OCH_3)_3$] kullanılarak 800 ile 1000 °C sıcaklıkları arasında yaklaşık 10^{-2} Pa basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde gerçekleştirilen bir borlama işlemidir [29,43]. Plazma borlama işleminde basınç değişim oranları ve işlem sıcaklığı, uygulanan akım yoğunluğu, gaz karışım oranları gibi faktörler ile mikroyapı büyümesi ve borür tabakalarının bileşim ve derinlik kontrolü yapılabilmektedir. Ayrıca plazma borlama yönteminde düşük işlem sıcaklıklarında borlama işlemi gerçekleştirilebilmektedir [24,42,44]. Plazma borlama işleminin en önemli dezavantajı, kullanılan gazların aşırı zehirli, patlayıcı ve korozif olmasıdır [24,45,46].

2.3. Borlama Prosesinin Endüstriyel Uygulama Alanları

Borlanan malzeme yüzeyinin genel olarak sahip olduğu; yüksek sertlik, yüksek ergime sıcaklığı, aşınma direnci, yüksek kırılma tokluğu, asitlere karşı dayanıklı oluşu gibi birçok üstün özelliği sayesinde bu malzemelerin kullanım ömrü artmakta ve bu sayede büyük ekonomik faydalar sağlanmaktadır [25,29,37]. Borlama işlemi bu yönleriyle endüstride makine sanayi ilk sırada olmak üzere farklı alanlarda tercih edilmektedir. Borlama prosesi makine sanayinde zimbalar, miller, helezon gövdeleri, koruma merdaneleri, bilyalı mafsallar, konik dişli çarklar (mahruti dişliler), pres kalıpları pompa pistonları, dişli kutular, konik yay diskleri gibi birçok malzemede kullanımı bulunmaktadır. Ayrıca borlama prosesi otomotiv sanayinde transmisyon parçaları ve subaplarda; tarım alanında pulluk demirlerinde; sentetik madde sanayi ve tekstil sanayinde enjektör meme plakaları, iplik kılavuzları, vites kutuları, darbe plakaları, ince borularda; kimya sanayinde vida gövdelerinde, pompa muhafazaları ve pompa gövdelerinde; seramik sanayinde press zimbaları, cıvata başları, cüruf filtreleri ve delikli plakalarda; döküm sanayinde (demir olmayan metaller çinko gibi) döküm ağızları, kütük kalıplar, mandrenler, yataklar ve yataklarda kullanılmaktadır [24].

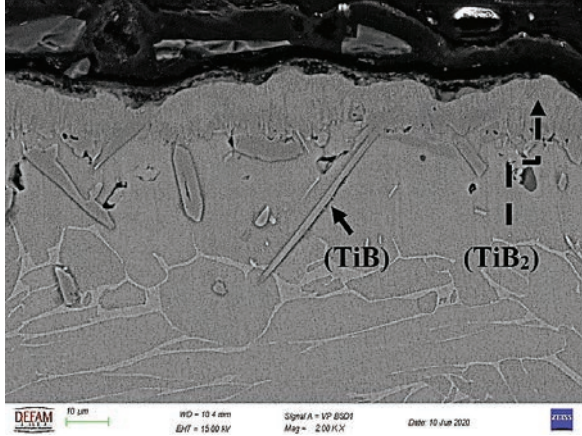
3. TİTANYUM ALAŞIMLARININ BORLANMASI

Titanyum ve alaşımlarının hafif olması, mekanik özelliklerinin iyi oluşu, biyouyumlu bir malzeme olması, korozyon direncinin yüksek olması gibi üstün özellikleri sayesinde önemli ölçüde medikal, havacılık ve savunma sanayinde kullanılmaktadır. Ancak titanyumun nispeten düşük deformasyon sertleşme davranışı, zayıf aşınma dayanımı ve temas şartlarında arayüzeye yapışma ve tutunma eğilimi gibi olumsuz yüzey özellikleri mühendislik uygulamalarında kullanım alanlarını daraltmaktadır. Bu nedenle titanyum ve alaşımlarının yüzey özelliklerinin geliştirilmesi (alaşım yüzeyinin sertleştirilmesi, aşınma ve yorulma dayanımlarının iyileştirilmesi) için çalışmalar ve araştırmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda; CVD (kimyasal buhar biriktirme) yöntemi ile karbürleme, PVD (fiziksel buhar biriktirme) yöntemi ile nitrürleme, lazer yüzey işlemi, termal oksidasyon, iyon nitrürleme, sıvı ve katı hal difüzyonu ile borlama gibi birçok yüzey modifikasyon yöntemi kullanılmaktadır. Tüm bu yöntemlerin temel amacı; yüzey ve hemen altında nitrür, karbür, borürden sert bileşikler veya N, C ve O bakımından zengin sert yüzey altı tabakaları oluşturmaktır. Ancak ifade edilen bu yöntemlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin, nitrürleme işlemi malzemenin yüzey sertliğini 9-12 GPa'a kadar çıkarmakta, ancak aşınma dayanımında çok yüksek artışlar elde edilememektedir. Oksijen temelli yüzey sertleştirme işleminde ise yüzey sertliği ancak 5-12 GPa'a kadar yükseltilebilmektedir. Ayrıca nitrürleme ve oksidasyon yöntemleri ile elde edilen yüzey ve yüzey altı tabakalarının aşırı kırılganlığı da diğer bir negatif durumdur. Öte yandan PVD ve CVD yöntemlerinde ancak 1-10 µm gibi düşük kaplama kalınlıkları elde edilebilmektedir. Bunun yanı sıra lazer yüzey işlemi hem proses karmaşıklığı ve yüksek maliyet hem de ergitme sırasında oluşacak yüzey oksidasyonu gibi sorunları beraberinde getirmektedir. Borlama yöntemi ifade edilen bu yöntemlere göre daha düşük işlem maliyetine sahiptir ve kolayca uygulanabilmektedir. Ek olarak borlama işlemi ile nispeten daha yüksek tabaka kalınlığı, yüzey sertliği ve aşınma dayanımı özellikleri elde edilebilmektedir [47].

Titanyum alaşımlarının borlanması ile genel olarak: sertlik, korozyon direnci ve aşınma dayanımı gibi özellikler gelişirken; borlanan yüzeyin sürtünme katsayısı değeri düşmektedir [22]. Ayrıca Ti6Al4V alaşımının biyomedikal kullanımlarında ortaya çıkabilecek V ve Al iyonlarının insan organizması üzerindeki toksik etkilerini önlemek amacıyla bu alaşım borlanmaktadır. Böylece alaşım yüzeyinde oluşan titanyum borür tabakaları sayesinde bu toksik etki engellenmeye çalışılmaktadır [47].

Titanyum ve alaşımlarının borlanması işleminde; borlama karışımı, sıcaklık, süre ve borlama yöntemi gibi parametreler, oluşan borür tabakasının morfolojisini ve kalınlığını etkilemektedir. Borlama işlemi için bir diğer önemli parametre ise borlama ortamıdır. Titanyumun oksijenle bağ yapma yatkın-

lığı nedeniyle borlama işlemi sırasında malzeme yüzeyinde oksit oluşumları muhtemeldir ve bundan dolayı borlama işlemi genellikle atmosfere kapalı yani koruyucu bir ortamda gerçekleştirilmektedir. Atmosfer ortamında yapılan borlama işlemleri genellikle başarısızlıkla sonuçlanabilmektedir.

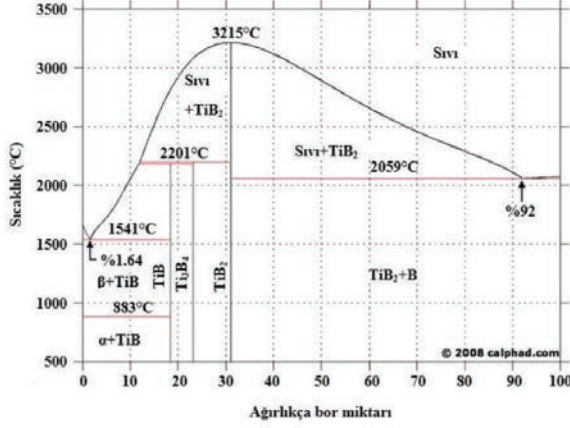


Şekil 4. Borlanmış Grade 5 titanyum alaşımının yüzeyinde oluşan çift fazlı tabakanın taramalı elektron mikroskopundan (SEM) alınan görüntüsü.

Titanyum alaşımlarının borlanması neticesinde malzeme yüzeyinde birden fazla faz içeren farklı morfolojilerde borür tabakaları oluşabilmektedir. Genellikle TiB_2 ve TiB olarak adlandırılan borür tabaka oluşumları gözlemlenmektedir. Dıştaki tabaka monolitik yapıdaki sürekli TiB_2 tabakası iken bu tabakanın altında yüzeye dik iğnemsî morfolojiye sahip TiB viskerler yer alır. Bu türden çift tabakalı kaplama, sert seramik bir dış tabakadan başlayarak bir sonraki tabaka boyunca metal altlığa kadar aşamalı bir geçiş sağlar [22]. Şekil 4’de borlanmış $Ti6Al4V$ (Grade 5) titanyum alaşımının yüzeyinde oluşan çift fazlı tabakanın görüntüsü görülmektedir.

Titanyum diborür (TiB_2), kovalent bağlı bir geçiş metali borürü olup, TiB sistemine ait ağırlıkça %31,1 bor içeren bir titanyum borürüdür [48]. $Ti-B$ sistemindeki en kararlı bileşiktir. TiB_2 dışında TiB ve Ti_3B_4 gibi iki adet titanyum borür daha bulunmaktadır [49,50]. Şekil 5’deki $Ti-B$ denge diyagramında TiB , Ti_3B_4 ve TiB_2 borürlerinin içeriğindeki ağırlıkça yüzde B miktarları gösterilmektedir [51]. Bor oranlarının TiB ’de %18-18,5, Ti_3B_4 ’de %22,4, TiB_2 ’de ise %30,1-31,1 olduğu diyagramda görülmektedir. Borun doyumluğa ulaşımı TiB , Ti_3B_4 , TiB_2 sırasını takip ederek artış göstermektedir. Bununla birlikte Ti_3B_4 bileşiğinin oluşumuyla ilgili fikir ayrılıkları bulunmaktadır. Çünkü teorik olarak Ti_3B_4 fazı oluşturulabilmesine rağmen uygulamalarda bu faza rastlanmamaktadır. Borca zengin kısımda bor ve titanyumun reaksiyonu sonucu ilk olarak TiB_2 oluşmakta fakat reaksiyon bölgesindeki bor konsantrasyonu %18-18,5 değerlerinin

altına düşmesiyle TiB fazına dönüşmektedir [49,50].



Şekil 5. Titanium – Bor Faz Denge Diyagramı [51].

Titanyum diborürün en temel özellikleri; yüksek sertliğe, yüksek ergime sıcaklığına (3225 °C), düşük yoğunluğa (4,5 g/cm³), iyi termal iletkenliğe (96 W/m/K) ve elektrik iletkenliğine (22x10⁶ Ω cm), sahip olmasıdır [48,52]. TiB₂ tabakasının sertliği yaklaşık olarak 30 GPa, devamında bulunan TiB visker tabakasının sertliği 20 GPa ve ana titanyum yapının sertliği ise yaklaşık olarak 4 GPa'dır. Titanyum üzerinde gelişen bu ikili tabakanın bir avantajı da TiB viskerlerinin yüzeydeki sert monolitik TiB₂ tabakasının altlık malzemeye tutunmasını sağlamasıdır [22]. Ayrıca borlama sonucunda oluşan titanyum borürler ile ticari saflıktaki titanyum altlık malzemenin termal genleşme katsayılarının (Ti: 8,6x10⁻⁶ °C⁻¹, TiB: 8,5x10⁻⁶ °C⁻¹ ve TiB₂: 8,1x10⁻⁶ °C⁻¹) mükemmel yakın şekilde uyumlu olduğu bilinmektedir. Böylece bu durum olası ısıtma ve soğutma durumlarından kaynaklanan termal stres oluşumlarını ve bu oluşumların neden olabileceği problemlerin meydana gelme ihtimalini azaltmaktadır [53].

4. Ti6Al4V ALAŞIMININ BORLANMASI

Ticari saflıkta titanyumun özellikle yük taşıma kapasitesi açısından mekanik özelliklerinin bazı implant uygulamaları için yetersiz kalması; Ti6Al4V alaşımının biyomedikal uygulamalarda kullanımını ön plana çıkarmaktadır [22,54]. Ek olarak Ti6Al4V alaşımının yüzey özelliklerinin geliştirilmesi bu uygulamalardaki performansına doğrudan etki etmektedir. Ti6Al4V alaşımının borlama işlemi ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesiyle ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle kutu borlama yöntemi tercih edildiği bilinmektedir (Tablo 2). Ancak; sıvı borlama, akışkan yataklı borlama, plazma borlama, plazma pasta borlama, elektrokimyasal borlama ve elektron demeti buharlaştırma

teknigi gibi çeşitli yöntemlerin de kullanıldığı görülmektedir (Tablo 3-4).

Tablo 2. Kutu borlama yöntemiyle borlanmış Ti6Al4V alaşımına ait literatür çalışmaları.

Borlama Yöntemi	Borlama Karışımı Bileşenleri	Borlama Süresi (Saat)	Borlama Sıcaklığı (°C)	Oluşan Fazlar ve Tabaka Kalınlıkları (µm)	Referanslar
KUTU BORLAMA	B+Na ₂ B ₄ O ₇ +C	2,5-4,5	750-1050	TiB ₂ : 1-6 TiB: 3-19	[55]
	Ekabor II	2,5	1100	TiB ₂ +TiB: 10	[56]
	B ₄ C+Na ₂ B ₄ O ₇ +Al+KCl	5-30	950-1100	TiB ₂ : 1,4-22 TiB: 3-10,9	[57]
	B ₄ C+Na ₂ B ₄ O ₇ +Al+NaCl	5	1000	TiB ₂ : ~7 TiB: 30-50	[58]
	B ₄ C+Na ₂ B ₄ O ₇ +Al+NaCl+CeO ₂			TiB ₂ : ~7 TiB: 30-65	
	B ₄ C+NaBF ₄	2-6	900-1050	TiB ₂ ve TiB	[59]
	B ₄ C+KBF ₄ +Al ₂ O ₃	4	850-950	TiB ₂ +TiB: 2-9	[60]
	B ₄ C ve Na ₂ B ₄ O ₇	5-20	1000-1100	TiB ₂ +TiB: 0,8-15	[61]
	B ₄ C+KBF ₄ +Al	20	1100	TiB ₂ ve TiB: ~10	[47]
	Amorf Bor+NH ₄ F-HF +Al ₂ O ₃	48	1010	TiB ₂ +TiB: 20	[62]
	Ticari Olmayan Borlama Karışımı +CeO ₂	5-10	1000	TiB ₂ , TiB: 2,5-25	[63]
	Katı Toz Borlama Karışımı[64]	5	1100	TiB ₂ +TiB: 4-8	[65]
	Katı Toz Borlama Karışımı[64] +Fe ₃ O ₄			TiB ₂ +TiB: 7-10	
	Katı Toz Borlama Karışımı[64] +Na ₂ B ₄ O ₇			TiB ₂ +TiB: 3-5	
	-	24	950-1050	TiB ₂ ve TiB:25	[66]
	B ₄ C+KBF ₄ +Al	12-20	1100	TiB ₂ +TiB: ~10	[49]
	C+NaCO ₃ +B	1-5	900-1100	TiB ₂ +TiB: 4,75-12,81	[67]
	B ₄ C+KBF ₄ +Al	20	1100	TiB ₂ +TiB: ~15	[68]
	B ₄ C+Na ₂ CO ₃	6	900-1050	TiB ₂ +TiB: 2,4-7,68	[51]
	Amorf Bor+ Na ₂ B ₄ O ₇ + Aktif Karbon	24	850-1200	TiB ₂ , TiB: 12,5-24,8	[22]
	Amorf Bor+ Na ₂ B ₄ O ₇ +Karbon	24	1100	TiB ₂ +TiB: 20,2	[69]
	Amorf Bor+ Na ₂ B ₄ O ₇ +Aktif Karbon[70][71]	24	1050	TiB ₂ : ~5 TiB ₂ + TiB: ~17	[72]
	B ₄ C+ KBF ₄	4	900	TiB: 3-5	[73]
	Amorf Bor+Al ₂ O ₃ +NH ₄ Cl	6	950	TiB ₂ : 5-10	[74]
B ₄ C+Al ₂ O ₃ + NH ₄ Cl					

Ti6Al4V alaşımına uygulanan borlama çalışmaları genel olarak ele alındığında öncelikle bu alaşımın yüzeyinde oluşturulmak istenen borür

tabakasının kalınlığı ve morfolojik yapısı ile ilgili daha iyi sonuçlar elde etmek üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Alfa ve beta titanyum faz yapıları farklı kristal yapılara sahiptir. Bu kristal yapılar farklı arayer difüzyon özelliğine sahip oldukları için bor elementinin difüzyonunun bu durumdan etkilendiği düşünülmektedir [61]. Saf titanyumun içyapısı yaklaşık 883 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda alfa fazından beta fazına dönüşmektedir [10]. Bu sebeple Ti alaşımları için gerçekleştirilen borlama çalışmaları genellikle bu sıcaklık değerinin üzerinde gerçekleştirilmektedir [61]. Ancak yüksek işlem sıcaklığı ve süresinin düşürülmesi ile işlem maliyetlerinin azaltılmasına yönelik çalışmaların da ele alındığı görülmektedir. Ek olarak borlama işleminin atmosfer şartlarında yapılabilmesine yönelik çalışmalar da mevcuttur. İfade edilen gelişimlerin sağlanabilmesi için farklı borlama yöntemleri ve borlama karışımlarının denenmesi, karışımlara yeni bileşenler (nadir toprak oksitleri) eklenmesi, borlama öncesi altlık malzeme yüzeyine ön işlemlerin (deoksidasyon vb.) yapılması gibi uygulamalar yapılmaktadır.

Peretti ve arkadaşları, borlama prosesinden önce bir grup Grade 5 alaşımının yüzeyine HF kimyasalı kullanarak bir yüzey ön işlemi (deoksidasyon) uygulaması yapmışlardır. Böylece borlama öncesinde altlık malzeme yüzeyinde bulunabilecek oksit oluşumlarını ortadan kaldırmışlardır. Deoksidasyon işlemi yapılmış ve yapılmamış iki grup altlık malzemeyi 750-1050 °C sıcaklıklarında 2,5-4,5 saat sürelerinde borlamışlardır. Beta geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda borlanan yüzey ön işlemi uygulanan numunelerde TiB tabakasının penetrasyon derinliğinin arttığını tespit etmişlerdir. Buna rağmen düşük sıcaklıklarda borlanan numunelerin kaplama adhezyonunun yüksek sıcaklıklarda borlanmış numunelere göre daha kötü olduğunu ifade etmişlerdir [55]. Atar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımının borlanması neticesinde aşınma dayanımının arttığı sürtünme katsayısı değerinin ise önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuşlardır [56]. Duan ve arkadaşları, yaptıkları çalışma sonucunda TiB tabakası kalınlığındaki değişimi Ti6Al4V alaşımındaki Al ve V alaşım elementlerinin konsantrasyonuna bağlamışlardır [57]. Peng ve arkadaşları, borlama karışımına nadir toprak elementi içeren bir oksit olan CeO₂ ekleyerek kutu borlama yöntemiyle Ti6Al4V alaşımını borlamışlardır. Bu katkı sayesinde TiB tabakasının büyümesinin ve borür tabakasının yapışma mukavemetinin arttığını raporlamışlardır. Ek olarak CeO₂ içeren borlama karışımı ile borlanan numunenin CeO₂ içermeyen borlama karışımı ile borlanan numuneye göre aşınma ve korozyon dayanımı açısından daha önde olduğunu tespit etmişlerdir [58]. Li ve arkadaşları da borlama karışımına CeO₂ ilave ederek borlama işlemleri yapmışlardır. Sonuç olarak borlama karışımına yaptıkları bu ilave ile bor atomlarının absorpsiyonunun ve konsantrasyonunun arttığını ifade etmişlerdir [63]. Kaplan ve arkadaşları, Ti6Al4V ala-

şımını atmosfer koşullarında borlayabilmek için borlama karışımına Al ilavesi yapmışlardır. Al içeren ve içermeyen borlama karışımları ile borlama işlemleri gerçekleştirerek bu işlemleri birbiriyle kıyaslamışlardır. Sonuç itibariyle Al içeren karışım ile atmosfer koşullarında başarılı sayılabilecek bir borlama işlemi gerçekleştirildiğini ve Al ilavesinin yüzey kırılmalarını önlediği ve atmosferik gazların neden olduğu oksidasyonu azalttığı sonucuna varmışlardır [47]. Singhal ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımının borlama işlemi sonucunda erozyon dayanımının nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. 48 saat süreyle 1010 °C’de gerçekleştirdikleri borlama işlemi sonucunda borlanmış yüzeyin (TiB₂) sertliğinin 2800-3450 HK olduğunu tespit etmişlerdir. Yaptıkları testler sonucunda, oluşan borür tabakasının son derece sert olduğu ve yüksek hızlı parçacık erozyonuna karşı mükemmel koruma sağladığı sonucuna varmışlardır [62]. Bose ve arkadaşları, Ti-6Al4V alaşımını borlamışlar ve borür tabakasını karakterize etmişlerdir. TiB₂ tabakasının hacim fraksiyonunun artan borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak arttığını ve bu tabakanın 3248 HV değerine varan bir sertliğe sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Borlanmış ve borlanmamış numunelerin korozyon direncini tespit etmek için Ringer’s çözeltisi kullanmışlardır. Borlanmış numunelerde borlama sıcaklığı ve süresinin artışı ile korozyon direncinin artış gösterdiğini ancak borlanmamış numunenin korozyon direncinin borlanmış numunelere göre daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir [67]. Tsipas ve arkadaşları, toz metalurjisi ve dövme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V numunelerini farklı borlama karışımlarıyla borlamışlardır. Borlama işlemleri sonucunda borlayıcı ortam olarak amorf bor kullanılması durumunda her iki yöntemle üretilmiş numunelerde uniform ve ince bir dış borür tabakası ve iç kısımda TiN oluşumu gözlemlenirken; B₄C kullanılması durumunda ise dışta TiN, içte bor ve diğer elementleri içeren bir tabakanın oluştuğu ifade edilmiştir [74]. Genel olarak Tablo 2’de verilen çalışmalar incelendiğinde farklı borlama karışımları ile farklı borlama parametreleri kullanılarak atmosferik ya da atmosfer kontrollü şartlarda borlama denemeleri yapıldığı görülmektedir. Çalışmalar sonucunda başarılı olan işlemler çeşitli yönlerden ele alınarak karakterize edilmektedir [22,49,51,59,60,65,66,68,69,72,73].

Tablo 3. Sıvı borlama yöntemiyle borlanmış Ti6Al4V alaşımına ait literatür çalışmaları.

Borlama Yöntemi	Borlama Karışımı Bileşenleri	Borlama Süresi (Saat)	Borlama Sıcaklığı (°C)	Oluşan Fazlar ve Tabaka Kalınlıkları (µm)	Referanslar
SIVI	Na ₂ B ₄ O ₇ +SiC	2-8	850-1000	TiB ₂ :50	[75]
	Na ₂ B ₄ O ₇ +SiC+Al	12-20	900-1100	TiB ₂ + TiB: ~12	[49]
BORLAMA	B ₄ C+SiC+ nadir toprak oksitleri (CeO ₂ , Y ₂ O ₃ , Gd ₂ O ₃ ve La ₂ O ₃)	15	900-1050	TiB ₂ : ~5	[76]
	Na ₂ B ₄ O ₇ +SiC	3-12	1000	TiB ₂ + TiB :12,28-26,34	[77]

Khater ve arkadaşları, boraks ve silisyum karbürden oluşan borlama karışımını kullanarak sıvı borlama yöntemiyle Ti6Al4V alaşımını başarılı bir şekilde borlamışlardır. Borlama sonucunda artan sıcaklık ve süre ile birlikte borür tabakası kalınlığının arttığını ve maksimum 50 µm değerine ulaştığını ifade etmişlerdir. TiB₂ tabakasının oluşumuyla altlık malzemenin yüzey sertliği 9 kat artarken, elastik modülü ise 2,5 kat arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca borlama işlemi sonucunda aşınma direncinde artış gözlenirken sürtünme katsayısı değerinin düştüğü ifade edilmiştir [75]. Kaplan çalışmasında, Na₂B₄O₇, SiC ve Al'dan oluşan yeni bir sıvı borlama karışımıyla Ti6Al4V alaşımını borlamıştır. Sonuç olarak borlanan yüzeylerin deformasyona uğramadığını ve yaklaşık 12 µm kalınlığında bir borür tabakası oluşumu meydana geldiğini ifade etmiştir [49]. Yuan çalışmasında, nadir toprak elementi içeren oksitlerin borlama işlemine etkisini araştırmıştır. Yuan, nadir toprak oksidi bor ile reaksiyona girerek nadir toprak borat bileşimini oluşturabileceğini ve bu boratın oluşumunun altlık malzeme için muhtemelen kısmi bir sıvı borlama ortamı oluşturduğunu ifade etmiştir. Böylece borlama karışımının altlık malzeme yüzeyinde temas alanının arttığını belirtmiştir. Borlanan numunelerin mükemmel mekanik özellikler gösterdiği ortaya konmuştur [76]. Keddam ve arkadaşları, 1000 °C'de ve farklı sürelerde Ti6Al4V alaşımı numuneleri sıvı borlama metodu ile borlamışlardır. İşlemler sonucunda 1790-2316 HV sertlik değerlerine varan sertlikte TiB₂ tabakası oluştuğu ve numunelerin aşınma dayanımlarının arttığı ifade edilmiştir [77].

Tablo 4. Diğer borlama yöntemleriyle borlanmış Ti6Al4V alaşımına ait literatür çalışmaları.

Borlama Yöntemi	Borlama Karışımı Bileşenleri	Borlama Süresi (Saat)	Borlama Sıcaklığı (°C)	Oluşan Fazlar ve Tabaka Kalınlıkları (µm)	Referanslar
Plazma Pasta Borlama	Na ₂ B ₄ O ₇	3-7	700-800	TiB ₂ : 1-3,2 TiB: 0,45-2,53	[78]
	Na ₂ B ₄ O ₇	3-7	700-800	TiB ₂ + TiB: 1,6-5,7	[79]

	B_4C	3-6	1000	$TiB_2 + TiB$: 3-10	[80]
Akışkan Yataklı Borlama	$Al_2O_3, B_4C + (NaCl$ veya $NaF; NH_4F$ veya $NH_4Cl)$	6	900-1000	$TiB_2 + TiB$: ~10	[81]
Plazma Borlama	-	3	870	$TiB_2 + TiB$: 2	[82]
Elektro-Kimyasal Borlama	$BBr_3 + NaBF_4$	4-8	700-900	$TiB_2 + TiB$	[83]
Elektron Demeti Buharlaştırma Tekniği	$Na_2B_4O_7 + Na_2CO_3$	2	500-900	$TiB_2 + TiB$: 5	[84]
		0.5	950	Ti_3B_5 : 55	[85]
	Amorf Bor	24	850-950	TiB_2 ve TiB : ~4-9	[86]

Keddama ve arkadaşları, plazma pasta borlama yöntemi ile $Ti6Al4V$ alaşımını borlamışlar ve oluşan borür tabakalarını karakterize etmişlerdir. Borlama işlemi neticesinde numune yüzeyinde iki fazlı (TiB_2 , TiB) bir borür tabakası oluşumu gözlemlenmiştir. Tabakanın sertliğinin borlama sıcaklığının artışı ile arttığı ve ortalama 2077-2356 HK sertlik değerlerinde olduğunu sertlik ölçümleri sonucunda ifade etmişlerdir. Kinetik analizler neticesinde TiB_2 ve TiB fazlarının aktivasyon enerjilerini sırasıyla 136,24 ve 63,76 kJ mol⁻¹ olarak hesaplamışlardır [78]. Anthymidis ve arkadaşları, akışkan yataklı borlama yöntemiyle $Ti6Al4V$ alaşımını borlamışlardır. Sonuç olarak 10 µm kalınlığında kısmen testere dişi morfolojisine benzeyen çift fazlı bir borür tabakası oluşumu gözlemlediklerini belirtmişlerdir [81]. Qin ve arkadaşları, plazma borlama yöntemiyle $Ti6Al4V$ alaşımını yüzeyinde 2 µm kalınlığında bir borür tabakası oluşturmuşlardır. Borlanmış numunenin aşınma dayanımı altlık malzemeye göre 35 kat arttığı ifade edilmiştir. Daha yüksek yük altında aşınma testleri gerçekleştirilebilmesi için borür tabakasının daha kalın olması gerektiğini vurgulamışlardır [82]. Çelikkann ve arkadaşları, elektrokimyasal yüzey kaplama ve temperleme işlemi olmak üzere iki adımda $Ti6Al4V$ alaşımını daha düşük sıcaklıklarda borlayarak başarılı bir şekilde borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir [84]. Kara ve arkadaşları, elektron demeti buharlaştırma tekniği ve temperleme işlemi olmak üzere iki adımda $Ti6Al4V$ alaşımında başarılı bir şekilde borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Borlama işlemi neticesinde numune yüzeyinde iki fazlı (TiB_2 , TiB) bir borür tabakası oluşumu gözlemlenmiştir. Tabakanın sertliğinin yaklaşık 1937 HV sertlik değerlerinde olduğunu sertlik ölçümleri sonucunda ifade etmişlerdir. Borlanmış $Ti6Al4V$ alaşımının, üst monolitik tabakanın (TiB_2) yüksek yüzey sertliğinden dolayı borlanmamış numuneye kıyasla gelişmiş aşınma direncine sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [86].

Tüm bu çalışmalar ışığında aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir:

- $Ti6Al4V$ alaşımının yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla borlama işleminin yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Borlama metodları içerisinde en çok kutu borlama yöntemi tercih edilmektedir.

- Ti6Al4V alaşımına uygulanan borlama işlemi genellikle 700-1200°C sıcaklık ve 2-48 saat süre aralığında yapılmaktadır.
- Borlama öncesi ön yüzey işlemleri yapılarak düşük borlama işlemi sıcaklıkları ve sürelerinde borlama işlemlerinin yapılabilmesi ve daha kalın tabakalar elde edilebilmesi üzerine çalışmalar vardır.
- Borlama işlemlerinde kullanılan borlama karışımlarında bor kaynağı olarak çoğunlukla B₄C ve amorf bor ve susuz boraks tercih edilmektedir. Ayrıca ticari karışımlar da kullanılmaktadır.
- Çalışmalarda, Ti6Al4V alaşımının atmosfer şartlarında borlanabilmesi için alternatif borlama karışımları elde edilmekte ve denenmekte olduğu görülmektedir. Ayrıca daha kalın tabakalar elde edilmesi için de alternatif karışımların denendiği çalışmalar mevcuttur.
- Ti6Al4V alaşımının borlanması ile yüksek yüzey sertliği, aşınma dayanımı gibi özellikler elde edilirken korozyon dayanımı açısından önemli bir gelişme sağlanmadığı ifade edilmektedir.
- Borlama sonucu elde edilen borür tabakasının yapışma dayanımının yüksek sıcaklıklarda yapılan borlama işlemlerinde daha iyi olduğu ifade edilirken, düşük sıcaklıklarda bu durumun iyileştirilebilmesi ile ilgili çalışmalar yapılması gerektiği vurgulanmaktadır.
- Borlama işlemi uygulanmış olan Ti6Al4V alaşımının toksik etki göstermediği, cilt içi irritasyona neden olmadığı ve vücut içi (in vivo) implant malzemesi olarak iyi bir aday malzemesi olabileceği ifade edilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] E. Uyguntürk, Titanyum Boruların TIG ve Lazer Kaynak Yöntemleri ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Karabük Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, Karabük. (2020).
- [2] E. Coşkun, Akışkan Yataklı Isıl İşlem Sistemlerinde Saf Titanyumun Nitrasyonu, Gebze Yüksek Teknol. Enstitüsü, Gebze. (2006).
- [3] M.B. Yücel, Dünyada ve Türkiye’de Titanyum, Maden Tetk. ve Aram. Genel Müdürlüğü, Türkiye. (2018).
- [4] N. Balaban, Titanyum ve Alaşımlarının Biyoyumluluklarının İncelenmesi, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul. (2007).
- [5] M.S. Yılmaz, Saf Titanyum Malzeme Yüzeyinde Titanyum Alüminyum İntermetalik Tabakasının Oluşturulması, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul. (2012) 32.
- [6] Ş. Arslan, Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Lazer Kaynak Kabiliyeti ve Biyoaktivite Özelliklerinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük. (2020).
- [7] C. İçdem, Saf Titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb Alaşımlarının Akışkan Yatak Ortamında Termal Oksidasyonu, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul. (2007).
- [8] M. Dinçer, Titanyum Yüzeyinin Yapay Vücut Sıvısı Yardımıyla Apatit Mineraliyle Kaplanmasına Hidrotermal Ön İşlem Şartlarının Etkisi, Gebze Yüksek Teknol. Enstitüsü, Malzeme Bilim. ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze. (2012).
- [9] H. Karakafa, Titanyumun Anodik Oksidasyon İşlemi ile Kaplanması, İstanbul Tek. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul. (2010).
- [10] H. Yıldız, Ti-6Al-4V Alaşımının Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Delik Üzerine ve Kesici Takıma Etkisinin Araştırılması, Batman Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Batman. 13 (2015).
- [11] A. Mavi, Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İşlenmesinde Kesici Takım Performansının Etkisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Ankara. (2013).
- [12] S. Akyol, Ti-6Al-4V Titanyum Alaşımının İşlenebilirliğinin Isıl İşlem Yardımıyla Arttırılması, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul. (2007).
- [13] S.A. Tepe, Havacılık Uygulamalarında Kullanılan Saf Titanyum ve Ti6Al4V Alaşımının Anodik Oksidasyon Davranışı ve Karakterizasyonu, Yıldız Tek. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul. (2019) 2016.

- [14] S. SEZER, Titanyum alaşımlarının kaynak sonrası mekanik özelliklerinin incelenmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, İSTANBUL. (2019).
- [15] A. SERT, Ti6Al4V Alaşımının Buzul İşlem Uygulanmış WC-Co Karbür Takımlar ile Talaşlı İmalatının İyileştirilmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, ESKİŞEHİR. (2017) 13–14.
- [16] Ö. Sıcakyüz, Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Anodik Oksidasyon Davranışı ve Karakterizasyonu, İstanbul Tek. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul. (2007).
- [17] E. Avcu, Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu ile Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Kocaeli. (2013).
- [18] Y. Yılmaz, Biyomalzeme Olarak Kullanılan Titanyum Alaşımlarının Mekanik Davranışları ve Korozyon Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkilerinin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, Elazığ. (2019).
- [19] Z. Yücel, Lazer ve Kumlama Yöntemleri ile Ti6AL4V Alaşımında Fonksiyonel Yüzeylerin Oluşturulması, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Kocaeli. (2008) 68–70.
- [20] Y.Y. Avcu, Ti6Al4V Titanyum Alaşımın Bilyalı Dövme Sonrası Aşınma Davranışının İncelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli. (2019) 55.
- [21] M. Cingi, Oksit Kaplı Titanyum ve Alaşımlarının Yorulma Davranışının İncelenmesi, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul. 44 (2008) 951–952.
- [22] G. Kara, Farklı Kristal Yapılardaki Titanyum ve Alaşımlarının Borlanması ve Bu Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Biyouyumluluk Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Karadeniz Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon. (2017).
- [23] H. Dinç, Inconel 718 Süperalaşımının Termokimyasal Borlanması, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul. (2013) (YÜKSEK LİSANS TEZİ).
- [24] İ. Türkmen, Farklı Bor Türevleri ile Alternatif Borlama Bileşimlerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa. (2018).
- [25] Y. Azaklı, Alaşım Elementi Olarak Tungstenin Saf Demirin Borlanma Davranışına Etkisi, Gebze Yüksek Teknol. Enstitüsü, Gebze. 4 (2012) 1689–1699.
- [26] A. Günen, Nano Bor Tozu ile Yüzeyi Alaşımlandırılan Östenitik Paslanmaz Çeliğin Mekanik Özellikler ve Korozyon Davranışının Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. Anabilim Dalı, Elazığ. (2012) 32.

- [27] F.E. Şeşen, Çelik Yüzeylerinde Elektrotermokimyasal ve Termokimyasal Difüzyon Tabakası Oluşumuna ve Difüzyon Tabakalarının Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul. 13 (2015) 1576–1580.
- [28] G. Kartal, Katodik Redüksiyon-Termal Difüzyon Yöntemi ile Metallerin Borlanması (KRTD-Bor) ve Süreçlerin Optimizasyonu, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Mühendislikte İleri Teknol. Anabilim Dalı, İstanbul. (2011) 119.
- [29] P. Topuz, Akışkan Yataklı Fırında Farklı Çeliklerin Borlanması ve Borlama Parametrelerinin Geliştirilmesi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul. (2009) ,(Doktora Tezi).
- [30] E. Kabadayı, Yüksek Krom ve Nikelli Dökme Çeliklerin Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Yaşlandırma ve Borlama Isıl İşleminin Etkisi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük. (2013).
- [31] G. Başman, AISI 316 L Tipi Paslanmaz Çeliğin Termokimyasal Difüzyon Yöntemi ile Borlanmasında, Borlama Banyosu Bileşenlerinin Borür Tabakası Özelliklerine Etkisi, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul. (2010) ,(Doktora Tezi).
- [32] U. Yapar, Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul. (2003).
- [33] S.E. Aydın, ERW Boru Üretim Makinelerinde Kullanılan Kalibre Makaralarının Aşınma Direncinin İncelenmesi, İskenderun Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay. (2017) 1–14.
- [34] T. Türkoğlu, Borlanmış AISI 304, AISI 420 ve AISI 430 Paslanmaz Çeliklerin İyapı,Sertlik Ve Korozyona Dayanıklılık Özelliklerinin İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir. (2017).
- [35] A. Ersöz, Elektrokimyasal Borlama ile Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul. (2008) 91.
- [36] İ. Akray, Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemlerinin Aşınma Direncine Etkisinin İncelenmesi, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul. (2007).

- [37] M. Sarı, Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Adıyaman. 8 (2019) 55.
- [38] G. Sağlam, Çelik Dişli Sondaj Matkaplarının Borlama Yöntemi ile Takım Ömrünün Uzatılması, Bartın Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın. (2016).
- [39] S. Karataş, FeB Toz Boyutunun AISI 4140 Çeliğinin Borlama Parametrelerine Etkisinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ. (2016).
- [40] B. Akca, Saf Molibdenin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta. (2015).
- [41] A.M. Aşgın, Borlanmış Tungstenin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. ve Malzeme Mühendisliği, Anabilim Dalı, Afyon. (2018).
- [42] R. Yurtseven, Tel Çekme Sanayinde Borlamanın Endüstriyel Uygulaması, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli. (2008) (Yüksek Lisans Tezi).
- [43] M. Barış, Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Ankara. (2007) (Yüksek Lisans Tezi).
- [44] A.S. Bora, Alaşımız Düşük Karbonlu Yassı Mamüllerin Elektrokimyasal Olarak Borlanması ve Borlama İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi, İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Met. ve Malzeme Mühendisliği, Anabilim Dalı, İstanbul. (2017) 1–14.
- [45] Ş. Ertürk, Termo-Kimyasal Yöntemle Kaplanmış Farklı Kesici Takım Malzemelerinin Talaşlı İşlem Kabiliyetinin İncelenmesi, Sak. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sak. (2010).
- [46] M. Özer, Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İyapı ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Anabilim Dalı, Balıkesir. (2011).
- [47] Y. Kaplan, A. Cetin Can, A. Ulukoy, A new medium for boriding of Ti6Al4V alloy for biomedical applications, Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl. 233 (2016) 109–119.
- [48] F. Akkurt, Üstün Özelliklere Sahip İleri Teknoloji Seramiği: Titanyum Diborür, J. Boron. 4 (2019) 203–208.
- [49] Y. Kaplan, İmplant Yapımında Kullanılan Ti6Al4V Titanyum Mekanik Özelliklerine ve Biyouyumluluğuna Borlama İşleminin Etkisi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (Doktora Tezi), Denizli. (2017).

- [50] Ç. Çelik, Nano Boyutta Titanyum Diborür Katkılı Sıcak Preslenmiş Hegzagonal Bor Nitrür–Titanyum Diborür Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi, İstanbul Tek. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul. (2010).
- [51] L. ERTÜRK, GR-2 ve GR-5 Titanyum Alaşımlarının Borlama Yöntemi ile Yüzey Kalitesinin İyileştirilmesi, T. c. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas. (2018).
- [52] C. Subramanian, T.S.R.C. Murthy, A.K. Suri, Synthesis and Consolidation Of Titanium Diboride, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 25 (2007) 345–350.
- [53] A. Ebrahimi, H. Esfahani, A. Fattah-alhosseini, O. Imantalab, Electrochemical Properties of Commercially Pure Ti with TiB/TiB₂ Coatings in Hanks' Balanced Salt Solution, *J. Mater. Eng. Perform.* 28 (2019) 1456–1468.
- [54] H.J. Rack, J.I. Qazi, Titanium alloys for biomedical applications, *Mater. Sci. Eng. C.* 26 (2006) 1269-1277.
- [55] V. Peretti, S. Ferraris, G. Gautier, C. Hellmich, O. Lahayne, B. Stella, S. Yamaguchi, S. Spriano, Surface treatments for boriding of Ti6Al4V alloy in view of applications as a biomaterial, *Tribol. Int.* 126 (2018) 21–28.
- [56] E. Atar, E.S. Kayali, H. Cimenoglu, Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy, *Surf. Coatings Technol.* 202 (2008) 4583–4590.
- [57] Y. Duan, P. Li, Z. Chen, J. Shi, L. Ma, Surface evolution and growth kinetics of Ti6Al4V alloy in pack boriding, *J. Alloys Compd.* 742 (2018) 690–701.
- [58] M.J. Peng, Y.H. Duan, L.S. Ma, B.P. Shu, Characteristics of surface layers on Ti6Al4V alloy borided with CeO₂ near the transition temperature, *J. Alloys Compd.* 769 (2018) 1–9.
- [59] A. Kaouka, K. Benarous, Characterization and properties of boriding titanium alloy Ti6Al4V, *Acta Phys. Pol. A.* 137 (2020) 493–495.
- [60] E. Jelis, N. Suwattananont, R.S. Petrova, Boronizing of Ti-6Al-4V Eli by powder pack method for biomedical application, *Bioeng. Proc. Northeast Conf.* (2005) 193–194.
- [61] F. Li, X. Yi, J. Zhang, Z. Fan, D. Gong, Z. Xi, Growth kinetics of titanium boride layers on the surface of Ti6Al4V, *Acta Metall. Sin. (English Lett.* 23 (2010) 293–300.
- [62] S.C. Singhal, An Erosion Resistance Coating For Titanium and Its Alloys, *Thin Solid Films.* 53 (1978) 375–381.
- [63] F.H. Li, X.H. Yi, J.L. Zhang, Z.G. Fan, Study on rare earth catalysis in the boriding process to titanium alloy, *Appl. Mech. Mater.* 48–49 (2011) 1177–1181.

- [64] Z.P. Yi, X. H., Fan, Z. G., Zhang, J. L., LI, F. H., & XI, Surface modification of Ti-6Al-4V alloy by pack boronizing, *Trans. Mater. Heat Treat.* 31(9) (2010).
- [65] L.N. Wang, F.H. Li, M.G. Dong, Y.N. Li, Effects of Additives on the Surface Layers of Boronized TC4 Titanium Alloys, *Adv. Mater. Res.* 887–888 (2014) 384–387.
- [66] A.P. Sanders, N. Tikekar, C. Lee, K.S.R. Chandran, Surface hardening of titanium articles with titanium boride layers and its effects on substrate shape and surface texture, *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME.* 131 (2009) 0310011–0310018.
- [67] S. Bose, L.C. Pathak, R. Singh, Response Of Boride Coating On The Ti-6Al-4V Alloy To Corrosion and Fretting Corrosion Behavior in Ringer's Solution For Bio-implant Application, *Appl. Surf. Sci.* 433 (2018) 1158–1174.
- [68] Y. Kaplan, A. Işitan, Tribological Behavior of Borided Ti6Al4V Alloy Under Simulated Body Fluid Conditions, *Acta Phys. Pol. A.* 134 (2018) 271–274.
- [69] G. Kara, G. Purcek, Mechanical properties and cell proliferation response of borided biomedical titanium alloys with different crystalline structures, *Surf. Coatings Technol.* 397 (2020) 126051.
- [70] S. Aich, K.S. Ravi Chandran, TiB whisker coating on titanium surfaces by solid-state diffusion: Synthesis, microstructure, and mechanical properties, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 33 (2002) 3489–3498.
- [71] N.M. Tikekar, K.S.R. Chandran, Anovel double-layered titanium boride coating on titanium: kinetics of boron diffusion and coating development, *JOM* 56. 144 (2004).
- [72] C. Lee, A. Sanders, N. Tikekar, K.S.R. Chandran, Tribology of titanium boride-coated titanium balls against alumina ceramic: Wear, friction, and micromechanisms, *Wear.* 265 (2008) 375–386.
- [73] R.S. Petrova, N. Suwattananont, V. Samardzic, The effect of boronizing on metallic alloys for automotive applications, *J. Mater. Eng. Perform.* 17 (2008) 340–345.
- [74] S.A. Tsipas, M.R. Vázquez-Alcázar, E.M.R. Navas, E. Gordo, Boride coatings obtained by pack cementation deposited on powder metallurgy and wrought Ti and Ti-6Al-4V, *Surf. Coatings Technol.* 205 (2010) 2340–2347.
- [75] M.A. Khater, S.A. Bouaziz, M.A. Garrido, P. Poza, Mechanical and tribological behaviour of titanium boride coatings processed by thermochemicals treatments, *Surf. Eng.* 37 (2021) 101–110.
- [76] K. Yuan, A study on RE Boronizing Process in a Titanium Alloy, *J. Therm. Spray Technol.* 30 (2021) 977–986.

- [77] M. Keddam, N. Makuch, B. Boumaali, A. Piasecki, A. Miklaszewski, M. Kulka, Liquid Boriding of Cp-Ti and Ti6Al4V Alloy: Characterization of Boride Layers and Tribological Properties, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 56 (2020) 348–357.
- [78] M. Keddam, S. Taktak, Characterization and diffusion model for the titanium boride layers formed on the Ti6Al4V alloy by plasma paste boriding, *Appl. Surf. Sci.* 399 (2017) 229–236.
- [79] V. Ataibis, S. Taktak, Characteristics And Growth Kinetics Of Plasma Paste Borided Cp-Ti And Ti6Al4V Alloy, Elsevier B.V., 2015.
- [80] K.G. Anthymidis, D.N. Tsipas, Boriding of titanium alloys in a fluidized bed reactor, *J. Materials Science Lett.* 20 (2000) 2067 – 2069.
- [81] K.G. Anthymidis, G. Stergioudis, D.N. Tsipas, Boride coatings on non-ferrous materials in a fluidized bed reactor and their properties, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 3 (2002) 303–311.
- [82] L. Qin, C. Liu, K. Yang, B. Tang, Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy prepared by double glow plasma surface alloying, *Surf. Coatings Technol.* 225 (2013) 92–96.
- [83] P. Kaestner, J. Olfe, K.T. Rie, Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4, *Surf. Coatings Technol.* 142–144 (2001) 248–252.
- [84] H. Çelikkan, M.K. Öztürk, H. Aydın, M.L. Aksu, Boriding titanium alloys at lower temperatures using electrochemical methods, *Thin Solid Films.* 515 (2007) 5348–5352.
- [85] A. Kaouka, K. Benarous, Electrochemical boriding of titanium alloy Ti-6Al-4V, *J. Mater. Res. Technol.* 8 (2019) 6407–6412.
- [86] G. Kara, G. Pürçek, Characterization of Boride Layer Formed on Ti–6Al–4V Alloy by Electron Beam Evaporation Technique, *Phys. Met. Metallogr.* 121 (2020) 1466–1472.

Bölüm 19

YÖRESEL GIDA VE YÖRESEL YEMEKLER İLE İLGİLİ BİR İNCELEME: KIRŞEHİR ÖRNEĞİ

*Gözde PEKÖZ¹
Özlem AYDIN²*

1 Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalı Yüksek Lisans Öğrencisi, ORCID ID: 0000-0001-6629-5276

2 Dr. Öğr. Üyesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü ORCID ID: 0000-0002-5645-3792

1.GİRİŞ:

Bu çalışmada Türk mutfak kültürü yöresel gıda ve yemek kavramına değinilmiş olup Kırşehir ili için bu kavramların önemi ve değerleri vurgulanmıştır.

Bilindiği üzere Anadolu'daki ilk siyasi birlik olan Hititler MÖ 2000'li yıllarda Orta Anadolu'da Kızılırmak çevresine yerleşmişlerdir. Kırşehir'i de içine alan bu bölgede yemek kültürü o zamanlardan bu zamanlara saklama, kurutma, pişirme, mayalama gibi yöntemlerle gıdaların muhafazaları sağlanarak gelişen teknoloji ile günümüze kadar ulaşmaktadır. Kırşehir de; Anadolu'nun tam orta noktası Kızılırmak havzasını içine alan bölgede olduğundan Hititlerden başlayan Selçuklu, Osmanlı ile devam eden bir saray mutfakı kültürü de yer almaktadır. Coğrafi özellikler bakımından ise sadece kendine has bu bölgede yetişebilen çeşitli gıda ürünlerine de rastlanabilmektedir.

Yöresel ürünler; hem tarım hem üretim bölgelerinde insan eli ile üretim gelenekleri ve metotlarından kaynaklanan o yöreye has gıda, yemek ve el işi ürünlerini kapsamaktadır şeklinde özetlenebilir. Örnek verecek olursak Urfa kebabı, Isparta gülü, Çek kristali, Kırşehir pekmezi, Parma jambonu, Roquefort peyniri vb. gibi. Yöresel ürünler, tarımsal ve üretim bölgesindeki beşeri faktörün birikim, deneyim, üretim gelenekleri ve tekniklerinden kaynaklanan o yöreye has gıda ve el işi ürünlerinden oluşmaktadır. Bu ürünler hem korunması ve devamlılığının sağlanması hem de ekonomik olarak da haksız rekabete uğramamak için birçok ülkede yasal düzenlemelere konu olmuştur (Tekelioğlu ve Demirer 2008).

CI işareti; özellikli bir niteliği, ünü veya kendini diğerlerinden farklı kılan özellikleri bakımından kökenin bulunduğu bölge, coğrafya, yöre veya ülke ile özdeşleşmiş ürünü gösteren işarettir. Coğrafi işaretler iki şekilde tanımlanabilir. Bunlardan biri menşe adı, diğeri mahreç işareti olarak ürünler iki grupta tescil edilir ve tescil edilen ürün yasal düzenlemeler ile korunması amaçlanır. Yöresel ürünlerin en temel özelliği coğrafya temelini dayanıyor olması, dolayısı ile doğası gereği belirli bir coğrafya dışında tekrar edilemez olmasıdır. Coğrafi işaret almış ürünler süreç içerisinde üretim bilgisi, meydana geliş şekli, yapılışı ve gerekli şartları nesilden nesile aktarılmış, belli bir ün, farklı ve aranan ürün haline gelerek cazibesi artırılmış ve pazar için üretilmeye başlanmışlardır.

Bu çalışmada Kırşehir in hem coğrafi hem yöresel ürünleri ve lezzetleri mutfak kültürü ile birlikte incelenecek hem de bu ürünlerden bazılarının tanımı ve özellikleri anlatılacaktır.

2. YÖRESEL YEMEK, YÖRESEL GIDA VE ÜRÜN KAVRAMI

Türk Mutfağında çeşitli, özellikli ve birçok yemek türünün bulunmasındaki sebeplerden başlıcası farklı bölgelere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. 7 farklı coğrafi bölge ve onlarca ayrı yöre ve demografik yapısı ile Türk mutfağının geçmişten günümüze gelen çok çeşitli yöresel yemekleri mevcuttur. Bulunduğu bölgeyi farklı kılan öğelerden bir tanesi şüphesiz ki o bölgeye ait olan yöresel yemeklerdir (Yüncü, 2010). Bu bölgelerin içinde barındırdığı iklim dolayısı ile elde edilen yöresel tarımsal ürünlerle şekillenen mutfak kültürü, aslında yöreyi yansıtan ve yöreye ait yemeklerin oluşmasında etmen olan en önemli unsurdur (Baran ve Batman, 2013). Kendi yöresi dışında benzer yöntemlerle üretilmeye çalışılan yöresel yemeklerin aynı lezzeti ve ya özgünlüğü vermeyeceği bilgisi aslında bu yemeklerin önemini vurgulamaktadır (Yüncü, 2010).

Yöresel Yemek, kendisiyle özdeşleşen yörenin tarımsal niteliklerine, malzemelerine, örf, adet ve geleneksel uygulamalarına, iklim koşullarına, maddi imkânlarına, kendine has ön hazırlık, pişirme ve sunum şekillerine sahiptir. Öyle ki; kendi bölgesinde yöresel yemeğin tüketilmesinde, sunulmasında bile belirli kurallar, kendine ait usuller ve inanışlar vardır. Yöresel yemekler taşıdığı kültürel özellikleri ile geleneklerin, törenlerin, düğünlerin, bayram ve cenaze gibi özel günlerin olmazsa olmazları olmuş, genellikle böyle özel anlara atfedilerek gelenekselleşmiş ve kültüre kabul edilmiştir (Hatipoğlu vd., 2013). Bu sebeple de yöre halkı tarafından bu gibi zamanlarda diğer yemeklere göre en üstün görülen, yapılmazsa şayet çevre tarafından ayıplanılacağı hissi uyanan yemeklerdir.

Yöresel ürün kavramı son yıllarda özellikle daha çok kullanılmaya başlamış olup temelinde tarımsal niteliği fazla ve gelişmekte olan ülkelerde daha revaçta olduğu gözlenmektedir. Yöresel ürünler İspanya’da “*productos de la tierra*- toprağın ürünleri”; İtalya’da “*prodotti tipici*- tipik ürünler” ya da “*nostr* - bizim” ya da “toprağımızın” adıyla anılmaktadır (Bérard ve Marchenay, 2008, s.19). Köken temeline dayanan *yöresel ürünler*, bitkisel kaynaklı ürünlerden, hayvansal kaynaklı ürünlere, işlenmiş gıda ürünlerinden, el-sanatları ürünlerine kadar birçok sektörde ticarete kullanılmışlardır. Bütün yöresel gıda üretim sistemlerinin, buldukları yer ile özel bir bağlantıları vardır. Yöresel ürünler, yerel kültürle bağlantısının olup olmadığına bakılmaksızın sadece o topraklarda bulunduğu için yerel ürünlerle aynı tutulmaktadır. “Yerel” sözcüğünün kabul edilen, genel anlamda bir tanımının olmaması, yöresel ile yerel kavramlarının birbirinin yerine kullanılmasını kolaylaştırmaktadır. Yerel ürünler terimi, genellikle insanların kendi yaşadıkları yerde yetişen ürünleri nitelemek için kullanılmaktadır; mekâna bağımlı bir içeriğe sahiptir (Giovannucci vd, 2010, s.101).

Geleneksel gıdalar, yöresel ürünler veya yerel ürünler; her bölgenin,

her yörenin kendine has özelliklerini ve aynı zamanda da kültürünü, mirasını yansıtır. İnsanlar ait oldukları bölgeye özel gıdalar ile beslenmeye, doğdukları andan itibaren başlarlar ve bu alışkanlık gittikçe vazgeçilemeyecek boyutlara taşınır, öyle ki ilerde kültür değişimi ya da yaşanan bölgenin farklı geleneksel ürünleri ile beslenmek durumunda kalan insanların ciddi boyutlarda mutsuzluk yaşadığı bilinmektedir (Hanssen ve Kuven 2016, Ötleş ve ark. 2016). Yöresel ürünlerin insanlar ve toplum üzerindeki sosyal ve kültürel etkilerinin yanı sıra ekonomik etkileri de son zamanlarda araştırmacıların odak noktası haline gelmiştir. Özellikle coğrafi işaret olarak nitelendirilmiş geleneksel ürünlerin pazar için ciddi bir payı olmasından kaynaklı bölge ekonomisi üzerine önemli katkılarının olduğu bilinmektedir.

3. KIRŞEHİR'İN TARİHÇESİ

Kırşehir, İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan ve Türkiye'nin tam orta noktalarından biri olan bir şehirdir. Anadolu'nun ortasında Kızılırmak Nehri'nin kavisinin güney bölümünde (Ruben 2014, s.1.) $38^{\circ}49$ ve $39^{\circ}48$ kuzey enlemleri ile $33^{\circ}25$ ve $34^{\circ}43$ doğu boylamları arasında yer almaktadır (*Yurt Ansiklopedisi* s.4896). Kırşehir kuzeyden Delice Vadisi, batıdan Kılıçözü Vadisi güneyden Kızılırmak Vadisi ve doğudan Seyfe Gölü ile çevrilidir (Ünsal 2012, s.14).

Yakın tarihine bakacak olursak 1867 yılında bucak, 1869 yılında ilçe, 1870 yılında sancak olmuştur ve Avanos, Keskin ve Mecidiye (Çiçekdağı) ilçeleri Kırşehir'e bağlanmıştır. 1924 yılında il olan Kırşehir'e Avanos, Mucur, Çiçekdağı, Hacıbektas ilçeleri bağlanmıştır. Kaman ise 1944 yılında Kırşehir'e bağlanmıştır. 20 Temmuz 1954 tarihinde 6429 sayılı kanunla Kırşehir ilçe yapılmıştır (Anonim 1, 2021). Nevşehir il, Kırşehir ise Nevşehir iline bağlı bir ilçe haline getirilmiş olup; Çiçekdağı ilçesi Yozgat'a, Kaman Ankara'ya, Hacıbektas, Mucur ve Avanos da Nevşehir'e bağlanmıştır. 1 Temmuz 1957'de ise Kırşehir tekrar il hâline getirilmiştir ve başka illere bağlanan ilçeler tekrar Kırşehir'e bağlanmıştır.

M.Ö zamanlara gidecek olursak M.Ö 2binli yıllarda Hititler, Kızılırmak civarına yerleşmişler ve şuan İç Anadolu ve Kırşehir olan bölgede krallık kurmuşlar ve sonra ise Anadolu'da siyasi birliği sağlamışlardır. Kırşehir bu dönemde Hitit Krallığı içerisinde yer almıştır (Ünsal s.81,86.). Bu bilgiler ışığında Kırşehir'in tarihi Hititler dönemi ile başlar yorumunu yapabiliriz. O dönemdeki isminin ne olduğu bilinmemekle birlikte bir dönem Aquae Saravenas (Akova - Saravena) adıyla (M.Ö. 2. yy.) bulunduğu anlaşılmıştır.

Daha sonra 'Makissos' (Macissus) olarak ismi geçmiş ve imparator I. Justinianus döneminde (M.Ö 527-568) yeniden kurulmuş ve 'Jüstiniapolis' olarak anılmaya başlamıştır. Anadolu Selçuklu döneminde ise

Gülşehri ismi ile bilinmektedir. Daha sonraları Anadolu'ya hakimiyetini artıran Türkler bu kente "Kır şehri" adını vermişlerdir. Zamanla ise söylene söylene 'Kırşehir' adını almıştır.

4. ANADOLU'DA VE KIRŞEHİRDE YEMEK KÜLTÜRÜ VE TARİHİ GELİŞİMİ

Yeryüzü olduğu andan itibaren insanoğlunun var olduğu süreçten bu zamana kadar ilk temel gereksinim beslenmedir. Beslenme ihtiyacını karşılama şekli yeryüzünde toplulukların yaşam biçimine bağlı olarak gelişerek günümüze kadar gelmiştir. Yerleşik düzene geçmeden önce insanlar çoğunlukta avcı-toplayıcı bir kültürü benimseyerek yaşam biçimi haline getirmiştir. İletişimin kuvvetlenmesi ve artan sanayileşme ile özellikle son 100-150 yıldır dünyada küreselleşmeye gidilmiştir (Uhri, 2011; Özbek, 2013).

Yerleşik düzene geçilmesiyle beraber mutfak kültürü gelişmeye başlamış, gıdaları muhafaza edebilme gereksinimi doğmuştur. Bu gereksinimle birlikte çabuk bozulan gıdaları daha uzun süre saklayabilmek için doğal olarak kurutma, mayalama, tuzlama vb. gibi yöntemler keşfedilmiştir. Örneğin et Orta Asya'da Türklerin günlük beslenme rutininde en önemli gıdalardan bir tanesidir. O dönemde eti tuzlayarak güneşte olgunlaştırarak kurutmuşlar ve dayanıklılığını artırarak uzun süre tüketilebileceğini keşfetmişlerdir. Günümüzde pastırmanın temeli o dönemlere dayanmaktadır. Orta Asya'da kurutulan et Anadolu'da çemenle buluşmuş ve Türk mutfak kültüründe önemli bir yere sahip pastırma adını alarak günümüze kadar gelmiştir.

Anadolu'da yerleşik düzene geçen Türkler göçebe hayatları boyunca birçok geleneği ve alışkanlığı da beraberinde getirmişlerdir. Anadolu da var olan mutfak kültürü ile zamanla kaynaşmaya başlamış ve topluluklar birbirinden her anlamda etkilenmiştir.

Türkler yüzyıllar boyunca Anadolu da yaşamış ve mutfak kültürünün şekillendirilmesinde önemli roller oynamıştır. Özellikle Osmanlı ve Selçuklu saraylarında kullanılan mutfak teknikleri ve yeni tatlar tarih boyunca birçok bölge kültürleri ile etkileşim yaşamış ve bu yaşanan etkileşim Türk mutfağının zenginliğini sağlayan en önemli unsurlardan olmuştur (Baysal, 1993).

Anadolu'da kronolojik olarak yaşamış toplumlar şu şekilde sıralanabilir: Hattiler (M.Ö. 2500-630), Hititler (M.Ö. 2000-1200), Persler (M.Ö. 2000- M.S. 651), Firigyalılar (M.Ö. 1200- M.Ö. 7.yüzyıl), Urartular (M.Ö. 900-600), Lidyalılar (M.Ö. 700-547), Romalılar (M.Ö. I. yüzyıl - M.S. 476), Bizanslılar (M.S. 395-1453). Anadolu'da uzun yıllar boyu yaşamış bu devletlerin mutfak kültürleriyle ilgili olarak etkileşim ve aktarım dışın-

da çok net bilgiler bulunmamaktadır. Buna rağmen, Anadolu’da uzun bir dönem yaşamış ve oldukça geniş bir yayılma göstermiş, ayrıca beslenme kültürleri hakkında daha fazla bilgi sahibi olduğumuz Hititlerin mutfak kültürünü örnek olarak incelemek mümkündür (Belli, 2011; Arihan, 2012).

Hititlerin beslenmelerine ilişkin kanıtlara baktığımızda zengin besin ve gıda çeşitlerinin olduğunu görmekteyiz. Yaşadıkları yerlerde ve tapınaklarda mutfak ve yemekhanelere ait kalıntılar tespit edilmiştir. Un ve unlu mamullere ait ürünler oldukça gelişmişti öyle ki Kırşehir’in yufka ekmek kültürünün o zamanlara dayandığı düşünülmektedir. Eski kalıntılarda Hititçe metinlerde 180e yakın ekmek ve unlu mamulün adı geçmektedir. Bir ritüelde geçen ‘5 adet peynirli ekmek’ deyimini ekmeğe peynir katkısı yapılarak elde edildiğini göstermektedir. İnce açılmış ekmeğin üzerine bakliyatları pişirilerek dökülerek yenmesi de Kırşehir ile özdeşleşmiş olan Kuru yufka üzeri mercimekli bulgur pilavı tarifi ile alakalı olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Hititlerde et tüketimine bakıldığında kendilerinden önceki toplumlara göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Daha çok balıkçılık gelişmiştir. Bununla birlikte hayvanların sütlerinden de faydalandıkları tespit edilmiştir. Ayrıca, unlu mamuller ürettikleri de yapılan kazı çalışmalarında görülmüştür. Hititlerin tarımla uğraştığı, özellikle bakliyat ektikleri ve meyve bahçeleri olduğu bilinmektedir. Bunlara ilaveten yağın ve balın Hititler’in hayatında çok özel bir yeri olduğu görülmüştür. Mutfak kültürlerinin oldukça zengin bir çeşitliliğe sahip olması bundandır (Arihan, 2012; Şensoy, 2012).

Türkiye, coğrafi konum olarak üstün özelliklere sahip olmakla birlikte, toprak yapısı, jeolojik özelliği, topoğrafik yapısı, iklim özellikleri nedeniyle farklı bitkilerin yetişebilmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, Geleneksel Anadolu Mutfak Kültürünün özellikleri, özgünlüğü ve çeşitliliği nedenini açıklar niteliktedir. Anadolu’da yetişen 12 bin çiçekli bitki türü içerisinde yaklaşık 3 bin kadarının endemik olması bunun en önemli kanıtıdır (Baysal, 2002; Akın, 2010). Toplulukların birbirleri ile iletişimi ve etkileşimi de mutfak kültürünün çeşitlenmesinde önemli rol oynamıştır. Kırşehir’i de içine alan Geleneksel Anadolu mutfak kültürü de bu etkileşim sonucu yüzlerce yıllık emeğin ve çabanın sonucu şekillenmiştir.

5. COĞRAFİ İŞARET VE KIRŞEHİR’İN COĞRAFİ İŞARETLİ ÜRÜNLERİ

Yöresel ve geleneksel değerlerin sürdürülebilmesi, korunması ve devamlılığının sağlanması ve ekonomiye de katkı sağlaması için CI yani coğrafi işaretleme işlemi uygulanmaktadır. Belirgin bir özelliğe sahip ve bulunduğu yöreye ait ürünün ülke ile olan bağlantısını anlamlandıran sembollerdir. Bu semboller ile yerel ürünlerin diğer benzer ürünlerden ayırt edilmeleri sağlanmakta olup o ürüne bir nitelik kazandırmaktadır (Dayı-

soylu, 2017: 80). Kısaca, coğrafi işaretlemeyi tanımlarsak; o coğrafyaya ve yöreye ait geleneksel bir ürünün veya yerel bir değerın çeşitli yasalarla güvence altına alınarak korunması ve devamlılığının sağlanmasıdır (Üner, 2014: 25).

Türk Patent Enstitüsü'ne göre, herhangi bir ürünün kazandığı coğrafi işaret kavramı, ürünün kalitesi, özellikleri, kendine has ihtiva ettiği karakteristiği belirli bir coğrafi bölgeden kaynaklandığını tanımlayan bir haktır. Kültürel ve milli değerlerin korunması ve güvence altına alınması için coğrafi işaret tescili ile ürünün belgelenmesi, korunması, devamlılığın sağlanması ve aynı zamanda tüketici ve üreticinin korunması önem arz etmektedir (Can vd., 2012: 958).

Coğrafi işaretli ürünler iki ayrı ana başlık altında incelenebilir. Bunlardan biri “menşe adı” ve diğeri ise “mahreç işareti”dir. Bu iki kavram arasındaki en önemli farka bakarsak, üretim aşamasının gerçekleştirildiği ve olası gerçekleşebilecek olan yer olarak söyleyebiliriz. “Menşe adı” coğrafi işaretleme yapılan ürünün özelliklerinin bütünüyle ait olduğu tek bir bölgeden kaynaklı olduğu durumlarda ve adı geçen ürünün o bölge dışında aynı özelliklerle yetiştirilebilmesi ve/veya üretiminin mümkün olmadığıda verilen isimdir. “Mahreç işareti” ise coğrafi işaretleme yapılan ürünün özellikleri kısmen ürünün ait olduğu yöreden kaynaklandığı durumda verilir ve de o bölge dışında da aynı özelliklerde ürün elde etmenin mümkün olabileceği durumlarda verilen isimdir. Kısaca anlatacak olursak mahreç işareti ile işaretlenen coğrafi işaretli ürünler ait oldukları bölgelerin dışında da üretimi yapılabilmektedir. Ancak buradaki en önemli husus gerekli üretim teknikleri ve şartlar sağlanarak yapılmasıdır. Kendi bölgesinde bulunan ürünün aslının korunmasının gerekliliği bilinmelidir (Gökovalı, 2007: 144).

Eylül 2021 itibariyle ülkemizde toplam 817 adet coğrafi işaretlenmiş ve tescil belgesi bulunan ürün bulunmaktadır. Ayrıca onlarca tescil başvuruları yapılmış ancak henüz tescil alamamış da birçok ürün bulunmaktadır. Türk Patent ve Marka Kurumu istatistikleri incelendiğinde ve coğrafi işaretli ürün sayılarının oranları da gözlemlendiğinde gastronominin ve dolayısı ile gastronomi turizminin de Türkiye’de önem arz ettiği anlaşılmaktadır. Hala başvuru aşamasında olan ve coğrafi işaretlenmiş tüm bu ürünler ülkemizin sahip olduğu çeşitlilik, zenginlik ve gastronomi turizmi potansiyeli açısından üstünlük gösteren değerlerdir.

Coğrafi işaretleme ve tescil işlemleri için ülkemizdeki yetkili kuruluş Türk Patent Enstitüsü’dür. Türkiye’nin Coğrafi İşaret tescilini almış ürünlerine örnek verecek olursak; Ezine peyniri, Erzincan tulum peyniri, Çorum leblebisi, Malatya kayısı, Kayseri pastırması, Mustafakemalpaşa tatlısı, İzmit pişmaniyesi, Mersin cezaryesi, Maraş biberi, Kalecik karası

üzümü, Ödemiş patatesi, Anamur muzunu, Maraş dondurması, Afyon sucuğu, İnegöl köftesi, Adana kebabı, Ege inciri, Tarsus şalgamı, Ayvalık zeytinyağı, Aydın inciri, Gemlik zeytini Terme, Edirne tava ciğeri, Kırşehir hoşmerimi, Kırşehir çullaması, Kaman cevizi sayılabilmektedir (Anonim 2, 2021).

5.1. KAMAN CEVİZİ

Kaman cevizi Kırşehir'in Kaman ilçesi ile özdeşleşmiş olup coğrafi olarak sadece o bölgede o özellikte yetişebilmektedir. Türkiye'nin çok ilinde ceviz üretiminin olmasına rağmen Kaman, Kahramanmaraş, Gönük, Niksar, Erzincan, Ermenek, Adilcevaz, Bitlis gibi belli bölgelerimiz cevizleri ile meşhur olmuş bölgelerimizdir (Tosun, vd., 2008: 2). Üzü dünyaya yayılmış, dünya pazarlarında ve Türkiye'de büyük pazarlarda 'kaman cevizi' olarak satışı ve ticareti yapılmaktadır. 2020 yılında Türk Patent ve Marka Kurumu tarafından tescillenmiş olup, coğrafi işaret yani menşei işareti almıştır. Özellikleri arasında ince kabuklu oluşu, el ile kırılabilen bir yapıya sahip oluşu, yağ oranı, lezzeti, büyüklüğü, renginin beyaz oluşu sayılabilir. İyi ve kaliteli bir cevizde olması gereken özelliklerin çoğu Kaman cevizinde bulunmaktadır. Yapılan seleksiyon çalışmaları ile de daha kaliteli cevizler üretilmeye çalışılmaktadır.

Kaman Belediyesi tarafından her yıl 'ceviz festivali' düzenlenmektedir; bu festival sayesinde yerli yabancı turistlerin ilgisi çekilerek ekonomiye katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Kırşehir ili için en önemli yöresel ürünlerden bir tanesi şüphesiz Kaman cevizidir.

5.2. KIRŞEHİR ÇULLAMASI

2017 yılında coğrafi işaret (mahreç işareti) almış olan bu yöresel yemek halk ağzında tavuk suyu ile pişirilmiş koyu un çorbası diye bilinmektedir. Çullama adı aslında haşlanmış tavuk etleri siftilerek bu koyu un çorbasının üzerine çullanır. Adı buradan gelmektedir. Az malzeme ile lezzetli bir yemek olması ile meşhurdur.



Şekil 1. Kırşehir Çullaması

Şemsi Yastıman ‘memleket hasreti’ adlı şiirinde hoşmerim ve çullamanın adını hasretle anarken bu dizeleri coğrafi işaretlemeye tarihi delil olarak kullanılmıştır.

Tarifini verecek olursak;

- **Malzemeler**

1 bütün tavuk, 2 su bardağı un, ½ su bardağı sıvıyağ, 2 yemek kaşığı tereyağı (üzerine), ½ tatlı kaşığı domates salçası, pul biber ve ya kırmızı toz biber, karabiber, tuz.

- **Hazırlanışı**

Tavuk haşlanarak tavuk etleri siftilir. Un sıvıyağı ile pembeleşinceye kadar kavrulur (ne çok yanık ne çok beyaz olması istenir) ve soğumaya bırakılır. Un soğuyunca 8-10 su bardağı soğuk tavuk suyu ile özenir tuz ve salçası katılıp karıştırarak pişirilir. Topaklanmamasına (pelte kıvamında olacak) gayret edilir. Kaynamaya başlayınca 3-5 dakika daha ateşte bırakılır. Ocaktan alınca servis tabaklarına ve ya tepsiye dökülür. Siftilen tavuk etleri üzerine döşenir. Üzerine tereyağı eritilir dökülür. Pul biber veya kırmızı toz biber serpilip servis yapılır (Anonim 5, 2021).

5.3. KIRŞEHİR HÖŞMERİMİ

Hoş mu er'im?

Eski zamanların birinde köyde yaşayan bir bey hanımından tatlı istemiş. Eskiden malzeme yok yapamam demek ne hacet. Hanım hemen eldeki malzemelerle az şeker yumurta, süt, un karıştırıverip tavada yağda helva kıvamında dökülene kadar çevirerek pişirmiş. Tadına bir bakmış ki tadı kıt! Hemen akşam çayına katmak için ayırdığı iki yemek kaşığı şekeri de helvanın üzerine gezdirivermiş. Bey afiyetle yemiş. Hanım sormuş: Hoş mu er'im? (hoşlandın mı beğendin mi beyim?) (Anonim 3, 2020).

Bir rivayete göre bu hikâye ile adını almış olan hoşmerim tatlısının Kırşehir versiyonunda az malzeme ile bol lezzet amaçlanmıştır. Tatlıyı diğer şehirlerdeki hoşmerimden ayıran özellik içinde peynir olmaması ve üzerine az toz şeker serpilmesidir. 2017 yılında çullama ile birlikte yine Şemsi Yastıman'ın şiiri tarihe ayna tutarak coğrafi işareti (mahreç işareti) bu yöresel ürüne getirmeyi başarmıştır.



Şekil 2. Kırşehir Höşmerimi

Tarifini verecek olursak;

- **Malzemeler**

1 litre süt, 2 yumurta, 1.5 su bardağı şeker, 4 kaşık tereyağı, ½ çay kaşığı tuz, 1 çay bardağı sıvıyağ, alabildiğince un

- **Hazırlanışı**

Süt, yumurta, tuz ve üç dört yemek kaşığı kadar toz şeker iyice çırpılır ve alabildiğince un katılarak kek hamuru kıvamında bir hamur yapılır. Tereyağı ve sıvıyağ yanmaz tavada eritilir. Karışım içine ilave edilir ve sürekli karıştırılarak pişirilir. Hamur topaklanmaya başlayınca 3-4 yemek kaşığı şeker daha katılır. Hamur dökülmeye başladığında damağına yapışmıyorsa olmuş demektir. Tabaga alınca üzerine kalan toz şeker serpilir tercihe göre fitik veya ceviz ile servis yapılır. (Anonim 5, 2021)

6. KIRŞEHİRİN YÖRESEL GIDA ÜRÜNLERİ VE YÖRESEL YEMEKLERİNDEN DİĞER ÖRNEKLER

6.1. SÜLA KABAĞI YEMEĞİ

Tam anlamıyla bir saray mutfağı yemeği olup en önemli özelliği acı, tatlı, ekşi, tuzlu tatları bir arada ihtiva etmesidir. Kabağın özelliği ise sadece bu yörede yetişmesi ile Kırşehir'de geleneksel gıdaların başında yer almaktadır. Su kabağına benzerliği ile dikkat çeker. Uzun ince etli ve sulu bir yapısı vardır. Yemeği pişirildikten sonra 1 gün dinlendirilirse daha güzel olur.

Tarifini verecek olursak;

- **Malzemeleri**

1.5 kg yağlı kemikli kuzu eti, 1 adet orta büyüklükte süla kabağı, 2 adet soğan, 5 adet acı cin biberi, 3-4 adet domates, 1 su bardağı üzüm suyu (ve ya 1 dal koruk), 1 su bardağı toz şeker, 1 yemek kaşığı domates salçası, 1 tatlı kaşığı tuz, 2 tatlı kaşığı pul biber, 1 adet limon

- **Hazırlanışı**

Süla kabağı soyulur, çekirdekleri temizlenir ve 2-3 cm genişliğinde doğranır. Etler kemiğiyle birlikte doğranıp tencerenin dibine yerleştirilir. Temizlenen kabaklar üzerine konur, üzerine sırasıyla yemeklik doğranmış soğan, acı cin biberi, domatesler ve en son koruk (olmamış üzüm) veya üzüm suyu ilave edilir. 1 su bardağına yakın toz şeker üzerine serpilir. Aynı bir tabakta bir yemek kaşığı salça, pul biber ve tuz 1 su bardağı su ile karıştırılarak yemeğe dökülür ve birkaç damla da limon sıkılarak kısık ateşte tencerede pişmeye bırakılır (Anonim 4, 2021).



Şekil 3. Süla Kabağı Yemeği

6.2. AYVA BORANISI

Yine bir saray mutfağı örneklerinden bir tanesi olan ayva boranısı hem tatlı hem tuzlu hem mayhoş tatları bir arada bulundurmaktadır. Kırşehir mutfağının et yemekleri arasında yerini almıştır. Tarifini verecek olursak;

- **Malzemeler**

500 gram iri kuşbaşı et, 4 adet orta boy ayva, 2 yemek kaşığı tereyağ, 2 adet orta boy soğan, 1 su bardağı köy pekmezi, 1.5 yemek kaşığı toz şeker, 1 tatlı kaşığı domates salçası, 1 tatlı kaşığı pul biber, 1 çay kaşığı karabiber, 1 tatlı kaşığı tuz, 1-2 parça limon tuzu (ayva tatlı ise)

- **Hazırlanışı**

Ayvalar yıkanıp soyulmadan dilimlenir. Et, soğan ve tereyağ tencerede kavrulur. Salça, baharatlar ve tuz ilave edilerek kısık ateşte kavrulmaya devam edilir. Yaklaşık 1-1.5 litre arası kaynamış su ilave edilerek bir süre et pişmeye bırakılır. Şeker ve limon tuzu eklenerek et ile özdeşleşmesi sağlanır. Yaklaşık 20 dk pişen ete ayvalar eklenir ve bir o kadar da ayvalarla pişirilir. İçindeki malzemeler kontrol edilerek yumuşayana kadar pişirilir. Ocaktan almaya yakın pekmez ilave edilir ve birkaç dk sonra altı kapatılır. Birkaç saat ve ya en güzeli bir gün dinlendirilerek servis yapılır (Anonim 5, 2021).



Şekil 4. Ayva Boranısı

6.3. KURU BAMYA YEMEĞİ

Kırşehir’de yetişen çiçek bamyanın kurutulması ve kuşbaşı etle pişirilmesi ile elde edilen yöresel yemek türüdür. Başka yörelerde ‘bamya çorbası’ olarak adlandırılırken Kırşehir ‘de ana yemek olarak ‘kuru bamya yemeği’ sofralarda yerini almaktadır. Düğün yemeklerinin ise vazgeçilmezleri arasındadır. Tarifini verecek olursak;

- **Malzemeler**

100 gr kuru bamya, ½ kg kuşbaşı et, 1 yemek kaşığı tereyağı, 1 yemek kaşığı salça, 2 adet orta boy kuru soğan, tuz- karabiber- limon tuzu

- **Hazırlanışı**

Bamyalar ayıklanır yıkanır kaynayan limon tuzlu ve tuzlu suya atılıp yumuşayınca kadar haşlanır. Dödüklü tencere ile yağ eritilir soğan doğranır. Yağda pembeleştirilir. Kuşbaşı etler atılır salça da ilave edilip biraz kavrulur. Sıcak su katılır et pişinceye kadar pişirilir. Yumuşayan bamyalar ilave edilip tuz ve limon tuzu katılarak pişirilir (Anonim 4, 2021).

6.4. SULU KÖFTE

Halk dilinde ‘dügü’ adı verilen Kırşehir ince köftelik bulguru ve kıyma ile yapılan yine düğün yemeklerinin vazgeçilmezi olan ana yemek olarak sofralarda yer alan bir diğer yöresel yemektir.

Tarifini verecek olursak;

- **Malzemeler**

2 su bardağı ince bulgur, 300 gr kıyma (az yağlı), 1 yemek kaşığı un, 1 yumurta, 2 yemek kaşığı salça, ½ çay bardağı sıvı yağ, 1 adet kuru soğan, tuz, pul biber, karabiber

- **Hazırlanışı**

Bulgur, un, yumurta, ince doğranmış soğan, tuz, karabiber iyice yoğrulur ve 15 dakika dinlendirilir. Fındıktan biraz büyük parçalar alınır yuvarlanır ve hafif unlanır. Tencerede eritilen yağın içine baharatlar ve salça konur ve su ilave edilerek kaynamaya bırakılır. Yuvarlanan köfteler ilave edilerek 15-20 dk kaynadıktan sonra sıcak olarak servis edilir.

6.5. ÇİRLEME

Kırşehir Özbağ Kasabasına ait bu yöresel ürünün en önemli özelliği ‘çir’ yani çekirdekli kuru kayısı ve etin buluşmasıyla tatlı bir et yemeği lezzetini vermesidir. Bol tereyağı ve pekmez olmazsa olmazdır. Tarifini verecek olursak;

- **Malzemeler**

1 su bardağı nohut (ıslatılmış), 750 gram kuşbaşı et, 1 adet orta boy kuru soğan, 2 yemek kaşığı tereyağ, 1 tatlı kaşığı domates salçası, 1 kg çekirdekli kuru kayısı, 1 çay kaşığı tuz, 1 tatlı kaşığı pul biber, ½ çay kaşığı karabiber, 1 su bardağı üzüm pekmezi



Şekil 5. Çirleme

- **Hazırlanışı**

Nohut ve et ayrı ayrı haşlanır. İnce doğranmış soğan ve tereyağ tencerede sotelenir. Baharatları ve salçası konulur. Haşlanmış et ve nohut ilave edilir. Önceden ıslatılmış kayısılar tencerenin en üstüne konularak üzerini geçecek kadar su ilave edilir. Kayısılar yumuşayana kadar pişirilir. Pişmeye yakın pekmez ilave edilir. 10 dk daha kaynatılır. Üzerine tereyağ eritilip dökülür (Anonim 5, 2021).

6.6. AHİ HELVASI

Adını Ahiliğin başkentinden almış bu yöresel lezzet hem ismi hem içeriğindeki pekmezi ile adeta Kırşehir’i anımsatmaktadır. Tarifini verecek olursak;

- **Malzemeler**

4 su bardağı un, 2.5 su bardağı Kırşehir pekmezi, 1 su bardağı ceviz içi

- **Hazırlanışı**

Un yanmaz bir tavada kavrulur. Rengi çok hafif değişmeye başlayınca ocaktan alınır ve soğumaya bırakılır. Soğuyan kavrulmuş una, ceviz ve pekmez ilave edilerek iyice yoğrulur.1 gün oda sıcaklığında dinlendirilir. Şekil verilerek servis yapılır (Anonim 5, 2021).

6.7.KEDİ BATMAZ

İsmi halk arasında ‘kedi bile batmaz o kadar tatlı’ diye bir söylemden aldığı düşünülen az malzeme ile çok lezzetin sergilendiği bir yöresel üründür. Eski yöre halkı ellerindeki malzemeleri verimli kullanarak ve karıştırarak bu tarz lezzetler elde etmişlerdir.

Tarifini verecek olursak;

- **Malzemeler**

1 su bardağı Kırşehir pekmezi, 1 adet sulanmamış kuru yufka, 3 yemek kaşığı tereyağı, ½ su bardağı su, ½ su bardağı ceviz içi

- **Hazırlanışı**

Tereyağı eritilir. Üzerine pekmez hafif sulandırılarak dökülür. Bir iki dakika sonra ocağın altı kapatılır. Bir servis tabağına kuru yufkalar kırılarak ufak parçalara ayrılır. Üzerine ılık bir şekilde tereyağı pekmez karışımı gezdirilir. Ceviz içi ufaltılarak serpiştirilir (Anonim 5, 2021).

6.8.ASİDE

Kırşehir pekmezi ile yapılan lezzetli tatlılardan bir tanesidir. En önemli özelliği kaşıktan dökülene kadar tavada sürekli karıştırılarak pişirilmesidir. Tarifini verecek olursak;

- **Malzemeler**

2 su bardağı pekmez, 1 su bardağı su, bir fiske tuz, 3 yemek kaşığı tereyağı, ½ çay bardağı sıvıyağ, alabildiğince un

- **Hazırlanışı**

Bütün malzemeler karıştırılır (yağ hariç) kek kıvamında bir hamur yapılır. Sıvıyağ ve tereyağ eritildikten sonra hamur içine dökülür ve karıştırılarak pişirilir. Karıştırılan kaşıktan dökülene dek çevrilerek pişirilir. Ağza alındığında damağa yapışmıyorsa pişmiş demektir. Servis tabağında üzerine ceviz serpilerek servis edilir.

6.9.KEME

Bir trüf mantarı cinsi olup halk arasında ‘keme’ ve ya ‘domalan’ mantarı olarak bilinmektedir. Düşük kalorili, besin değeri yüksek ve lezzetli olması en önemli özelliğidir. Kırşehir’de özellikle dağlık yerlerde ve bazı köylerde toprak altında yetişir ve patatesi andıran görüntüsü vardır. Ekonomik değeri yüksektir.

6.10.PEKMEZ

Kırşehir pekmezi, yörede yetişen üzümlerden geleneksel yöntemlerle elde edilmektedir ve kendine has koku ve kıvamı ile dikkat çekmektedir. Yöre halkı için altından kıymetli ürün olarak bilinmesinin temelinde hikayelere ‘yangından pekmez küpü kaçıran Kırşehirli’ye ‘pekmez akıllı’ benzetmesi yapılması deyişi vardır.

6.11.KAYA TUZU

Tarihi 7 bin yıl öncesine dayanan Kırşehir’in Tepesidelik Köyü’nde bulunan kaya tuzu mağarasından Türkiye’nin önemli bir miktar tuz ihtiyacı karşılanmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarla desteklenen kaya tuzunun sağlık açısından faydaları dolayısı ile Kırşehir için de üretim ve dağıtım yapılan bu tesis oldukça önem arz etmektedir. Bu tesisin sağlık ve kültür turizmüne kazandırılması ülkemiz açısından da faydalı olacaktır.

6.12.CEMELE BİBERİ

Kırşehir Çayağzı Cemele Köyü’nde yetişen bu biber türünün özelliği çok acı, ince kabuklu ve lezzetli olmasıdır. Başka yörelerde üretim yapılması denenmesine rağmen Cemele dışında istenilen özelliklerde olmamıştır. O açıdan potansiyel olarak coğrafi işaretlemede menşei adı işaretine kuvvetli adaydır. Özellikle yaz aylarında dolmalık Cemele biberi kurutularak kış boyu dolması yapılarak tüketilir.

7. SONUÇLAR

Türk mutfak kültürü, yöresel yemek ve yöresel gıda kavramı şüphesiz ki eski çağlardan kalma beslenme, mutfak alışkanlıkları ile şekillenerek ve gelişerek günümüze kadar ulaşmıştır. Bu süreçte toplumların göç vasıtası ile birbirleri ile olan etkileşimi mutfak kültürüne ve aktarımına da yansımıştır. Kırşehir’in tarihine bakıldığında M.Ö. zamanlarından bugüne kadar birçok medeniyete ev sahipliği yaptığı bilinmektedir. Coğrafi konum olarak da tarım ve hayvancılık için elverişli topraklara sahip olan Kırşehir’de yöresel yemek ve yöresel ürünler dolayısı ile çok çeşitlidir. Gerek Saray mutfaklarından kalma yemekler, gerekse coğrafi anlamda sadece bu yöreye ait ürünler olsun yöresel ve geleneksel ürünlerin bir çok örneğini bünyesinde barındırmaktadır. Bu ürünlerden birkaçı Türk Patent ve Marka Kurumu tarafından verilen coğrafi işaretler ile korunurken, birçok ürünün

de coğrafi işaret alması için başvurusu yapılmıştır. Menşei adı (sadece o yörede üretilen) ve mahreç işareti (yöre dışında başka yerlerde de gerekli şartlar sağlanarak üretilen) adı verilen bu düzenlemeler yasalarla korunurken aynı zamanda nesilden nesile aktarılması, devamlılığının sağlanması, geleneklerin korunması ve kültür turizmi ile ekonomiye fayda sağlanması amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- (Anonim 1, 2021). Kırşehir Ticaret ve Sanayi Odası verileri <https://kirsehirtso.org.tr/kirsehir-tarihi/>
- (Anonim 2, 2021). Türk Patent ve Marka Kurumu verileri <https://ci.turkpatent.gov.tr/>
- (Anonim 3, 2020) Nurtaç Ceylan, 66, ev hanımı
- (Anonim 4, 2021) Fatma Ersan, 57, ev hanımı
- (Anonim 5, 2021) Nurten Büyüksaraçoğlu, 69, ev hanımı
- Arıhan, Seda. (2012) Antik Çağda Beslenme, Beslenme Antropolojisi-I, *Hatipoğlu Yayınları: 160, Beslenme ve Diyetetik Dizisi: 03, s. 45-78*, Ankara
- Baran, Z., ve Batman, O. (2013). *Destinasyon pazarlamasında mutfak kültürünün rolü: Sakarya örneği*. 14. Ulusal Turizm Kongresi Bildiriler Kitabı, 05-08 Aralık. Kayseri, Erciyes Üniversitesi Turizm Fakültesi, 1355-1367
- Baysal, Ayşe. (2002) Beslenme Kültürümüz, Kültür Bakanlığı Yayınları: 1230, Yayınlar Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Belli, Oktay. (2011) Eski Çağda Doğu Anadolu Bölgesi'nde Urartu Mutfak Kültürü, III. Uluslararası Doğu Anadolu Bölgesi, Geleneksel Mutfak Kültürü ve Erzurum Yemekleri Sempozyumu, 17-21 Ekim 2011, s. 27-65, Erzurum.
- Bérard L. ve Marchenay P., From Localized Products to Geographical Indications: Awareness and Action, Ressources des terroirs – Cultures, usages, sociétés UMR Eco-Anthropologie et Ethnobiologie Centre national de la recherche scientifique Alimentec - 01000 Bourg-en-Bresse, 2008.
- Can A., Sünnetçioğlu S. Ve Durlu Özkaya F., (2012), Sürdürülebilir Gastronomi Turizmi Hareketliliğinde Coğrafi İşaretlemenin Rolü, Journal Of Tourism And Gastronomy Studies 1/1, 13-20.
- Dayısoylu K. S., (2017), Kahramanmaraş'ın Coğrafi İşaretli Ürünleri ve İlin Potansiyel Durumu, *Ksü Doğa Bil. Der.*, 20(1), 80-88.
- Giovannucci D., Barham E. ve Pirog R., “Defining and Marketing ‘Local’ Foods: Geographical Indications for U.S. Products”, The Journal of World Intellectual 170
- Gökovaı Ü., (2007), Coğrafi İşaretler ve Ekonomik Etkileri Türkiye Örneği, *İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, Haziran, Cilt 21, Sayı 2, 141-160.
- Hanssen, I., Kuven, B.M. 2016. Moments of joy and delight: the meaning of traditional food in dementia care. Journal of Clinical Nursing, 25: 866-874. Property, Special Issue: The Law and Economics of GIs, Vol.13, Issue 2, s.94-120, 2010.

- Hatipoğlu, A., Zengin, B., Batman, O., ve Şengül S. (2013). Yöresel yemeklerin, kırsal turizm işletmeleri menülerinde kullanılma düzeyleri: Gelveri örneği. *Uluslar Arası Sosyal ve Ekonomik Bilimler Dergisi*, S: 69, 1-21.
- Sarıçoban, C. ve Karakaya, M. 2004. Geleneksel Gıdalardan Köpük Helvanın Endüstriyel Ölçekte Üretimi. Geleneksel Gıdalar Sempozyumu. 23-24 Eylül 2004, 104-105, Van.
- Tekelioğlu, Y. ve Demirer, R. 2008. Küreselleşme Sürecinde, Yöresel Ürünler ve Coğrafi İşaretlerin Geleceği, *İgeme'den Bakış Dergisi*, Sayı 36, 87-102.
- Uhri, A. (2011) Boğaz Derdi, Arkeolojik, Arkeobotanik, Tarihsel ve Etimolojik Veriler Işığında Tarım ve Beslenmenin Kültür Tarihi, Ege Yayınları, Kitap Matbaacılık San. Tic. LTD. ŞTİ., İstanbul.
- Üner E. H., (2014), Her Şey Dahil Sistemde Türkiye Gastronomi Turizmi Potansiyelinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atılım Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Walter Ruben, *İç Anadolu'da Küçük Bir Eskiçağ Şehri: Kırşehir*, (Çev. Cemal Sakallı), Kırşehir Belediyesi Kültür Tarihi Yayınları, Kırşehir, 2014, s.1.
- Tosun, İ., Akçay, M. E., Erdogan, V., Hantas, C., Soyergün, S. ve Çelikel, F. G. (2008). "Ceviz Yetiştiriciliği", *Yalova Atatürk Merkez Bahçe Kültürleri Araştırma Enstitüsü Yayını*, Yalova.
- Ünsal, V. *Eskiçağda Kırşehir ve Çevresi*, Kırşehir Belediyesi Kültür-Tarihi Yayınları Serisi No: 11, Kardeşler Ofset, Kayseri 2012, s.14.
- Yurt Ansiklopedisi*, "Kırşehir", c.7, Anadolu Yayıncılık, İstanbul, 1982-1983, s.4896.
- Yüncü, H. R. (2010). *Sürdürülebilir turizm açısından gastronomi turizmi vepersembe yaylası*. 10. Aybastı-Kabataş kurultayı, Aybastı-Kabataş Kurultayı Yayınları No: 11 Detay Anatolia Akademik Yayıncılık Ltd. Şti.

Bölüm 20

SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR
YAPILARINDAKİ MANYETİK
MALZEMELERİN İNCELENMESİ

Ali Sinan ÇABUK

1. GİRİŞ

Günümüzde elektrikli araçlar ve beyaz eşya endüstrisi başta olmak üzere pek çok alanda sabit mıknatıslı senkron (SMS) motorların giderek yaygın olarak kullanıldığını görmekteyiz. SMS motorları doğru akım motorları ve asenkron motorlarla kıyaslandığında birçok özellikleriyle üstün oldukları görülmektedir (Jin vd., 2021; Lee ve Lim, 2021). Bu özellikler; yüksek verim, uzun ömür, düşük bakım maliyeti, düşük hacim-ağırlık oranı, düşük gürültü seviyesi, kolay kontrol edilebilme, yüksek hız, yüksek moment ve çıkış gücüdür.

SMS motorlarda stator veya rotorunda uyarma sargısı barındırmadığından toplam sargı miktarı düşüktür ve buna bağlı olarak bakır kayıpları da azalmaktadır. Bu tip motorlar alan uyarmalı olarak çalıştıklarından dolayı fırça ve kollektörden kaynaklanan mekaniksel kayıpları yoktur (Jin vd., 2021; Çabuk, 2016; Yılmaz, 2005). Bunun yanında stator sargıları içindeki kesitsel alanın daha geniş ve gövde boyunca ısı iletiminin daha kolay olmasından dolayı sıcaklık etkisinden kaynaklı kayıplar azalmıştır. Hava aralığı akısının sabit mıknatıslar tarafından sağlanması nedeniyle, endüvi akımı asenkron motorlara göre daha yüksektir.

Kollektör ve fırça sistemi olmadığından bakım gereksinimleri oldukça azdır ve bakım maliyetleri oldukça düşüktür (Gieras, 2010). Aynı sebepten dolayı ömrünün uzaması da sağlanmaktadır.

Kollektör ve fırçanın olmaması motor uzunluğunu düşürür. Bu sadece alandan tasarruf sağlamaz ve aynı zamanda rulmanlar arasındaki uzaklık düştüğü için rotorun kuvvet veya moment etkisi altında şekil değiştirmeyen sabitliği en iyi hale geldiğinden yüksek hızlara çıkabilir (Jin vd., 2021; Çabuk, 2016). Gerek sargıların azalması gerekse fırça ve kollektör düzeneğinin olmamasından dolayı aynı kapasitedeki bir doğru akım (DA) motorundan ve asenkron motordan daha küçük ve hafiftir.

Fırçalı DA motorları ile karşılaştırıldığında bu motorların fırçalarının oluşturduğu arklardan kaynaklı elektromanyetik etkileşim ve elektromanyetik gürültü SMS motorlarda önem arz etmeyecek kadar düşüktür (Pellegrino vd., 2016).

SMS motoru mil momenti motor giriş akımıyla ilişkili olduğundan asenkron motorlarla karşılaştırıldığında kontrollerinin oldukça kolay olduğu görülmektedir. Bununla birlikte rotor yapısında sargı barındırmadığından kontrol parametreleri azalma gösterir ve bundan dolayı hız kontrolleri kolaydır.

Klasik doğru akım motorlarındaki kollektör ve fırça yapısı hem mekaniksel anlamda hem de komütasyon anlamında hızı sınırlamaktadır. Bu

olumsuz etki SMS motorlarında bulunmamaktadır.

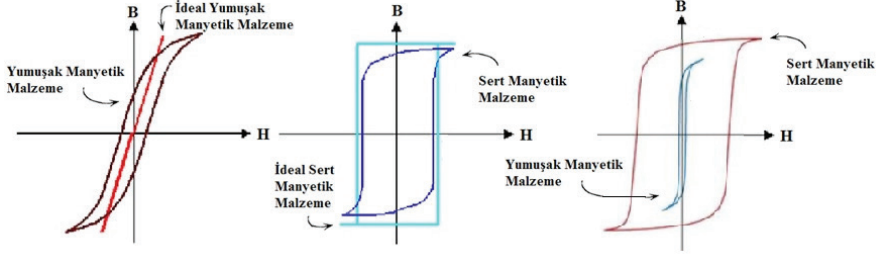
Aynı yapıya ve soğutma türüne sahip DA motorlarıyla karşılaştırıldığında güç faktörü ve çıkış gücü daha yüksektir. SMS motorları asenkron motorlar ile kıyaslandığında ise benzer değerdeki giriş gücü için daha az eylemsizlik değerindedirler (Waheed ve Ro, 2021; Çabuk, 2016). Bununla birlikte uygulanan elektriksel momente karşı daha hızlı cevap verirler. Kı-saca moment-eylemsizlik oranı daha yüksektir (Yılmaz, 2005).

Belirtilen bu üstün özelliklere sahip olan SMS motorlarının istenilen güç, verim ve moment gibi değerlere ulaşması tasarım kriterlerine bağlıdır. Tasarımlarda motoru oluşturan malzeme seçimleri büyük önem taşımaktadır. Manyetik malzemelerin belirlenmesi ve seçim kriterlerinin başında malzemeye etki eden alan şiddetine vermiş olduğu tepkidir. Bu tepkilere göre manyetik malzemeler; diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik malzemeler olarak sınıflandırılır (Furlani, 2001; Çabuk, 2016, Yılmaz 2005).

Diyamanyetik malzemeler; yüksek değerdeki elektromanyetik alandan uzaklaşmaya yönelirler, yani düşük güçlü olarak etkilenen malzemelerdir. Manyetik alan kuvvet çizgilerini düşük oranda dışarıya doğru iterek, güçlü elektromanyetik alana dik bir şekilde kendilerini yönlendirirler. Göreceli geçirgenlikleri 1 değerinden daha azdır (örneğin; bizmut için $\mu_r = 0,99983$). Diyamanyetizma, tek sayıda elektronlara sahip maddelerde görülür (Furlani, 2001; Vinga vd., 2017). Radyum, magnezyum, hidrojen, bakır, altın, gümüş, potasyum ve bizmut diyamanyetik gruba girerler.

Paramanyetik malzemeler; manyetik akı kuvvet çizgilerini kendi içlerine yönlendirecek şekildedir ve göreceli geçirgenlikleri ise 1 değerinden çok düşük oranda yüksektir (örneğin; platin için $\mu_r = 1,00036$). Yüksek değere sahip olan manyetik alana kendilerini paralel olarak konumlandırır (Furlani, 2001; Sweetnam, 2013). Silisyum ve alüminyum bu tip malzeme sınıfında tanımlanmaktadır.

Ferromanyetik malzemeler; yüksek bir biçimde mıknatıslanma etkisine sahip olan ve uğrayabilen maddelerdir. Göreceli geçirgenlikleri çok yüksektir ve 10^4 hatta 10^6 düzeyine kadar çıkabilen maddelerdir (örneğin; nikel, demir, ferrit, kobalt gibi). Ferromanyetik malzemeler gidergenliklerine göre sert manyetik malzeme ve yumuşak manyetik malzeme olarak ayrılmaktadırlar (Furlani, 2001; Wu ve Pang, 2013). Bu iki materyal arasındaki fark Şekil 1'deki histerezis eğrilerinde görülmektedir.



Şekil 1. Sert ve yumuşak manyetik malzeme histerezis eğrisi (Furlani, 2001)

2. YUMUŞAK MANYETİK MALZEMELER

Yumuşak manyetik malzemeler SMS motorların stator sacı, mil ve sırt demirinde kullanılır. Bu malzemelerinde iyi analiz edilmesi motor çıkışı parametreleri için son derece önemlidir. Manyetik akı yoğunluğu, dizme faktörü ve bükme sayısı gibi özellikleri imalatla önemli rol oynar. SMS motor imalatında kullanılan yumuşak manyetik malzemelerin bazı özellikleri Tablo 1’de verildiği gibidir. Bu malzemelerin doğru anlaşılıp ona göre seçim yapılması SMS motoru imalatı için büyük öneme sahiptir.

SMS motorların performans parametrelerine direk etkisi olan manyetik malzemelerin özelliklerinin anlaşılması imalatçılar tarafından zorlaştırılmaktadır. Avrupa, Asya ve Amerika pazarı gibi farklı bölgelerdeki imalatçılar farklı standartlar kullandıkları için malzemelere ait tanımlamalar da değişmektedir.

Tablo 1 Yumuşak Manyetik Malzeme Özellikleri (Erdemir Romania, 2021)

Çelik Türü	Nominal Çelik Kalınlığı [mm]	En Yüksek Toplam Kayıp (50Hz, 1,5 T için) [W/kg]	En Düşük Manyetik Akı Yoğunluğu [A/m]			En Yüksek Eşyönsüzlük Kaybı (50Hz 1,5 T için) [%]	En Düşük Dizme Faktörü	En Düşük Bükme Sayısı
			2.500	5.000	10.000			
M330-35A	0,35	3,3	1,49	1,60	1,70	±17	0,95	3
M330-50A	0,50	3,3	1,49	1,60	1,70	±14	0,97	3
M350-50A		3,5	1,50	1,60	1,70	±12	0,97	5
M400-50A		4,0	1,53	1,63	1,73	±12	0,97	5

M470-50A		4,7	1,54	1,64	1,74	±10	0,97	10
M530-50A		5,3	1,56	1,65	1,75	±10	0,97	10
M600-50A		6,0	1,57	1,66	1,76	±10	0,97	10
M700-50A		7,0	1,60	1,69	1,77	±10	0,97	10
M800-50A		8,0	1,60	1,70	1,78	±10	0,97	10
M940-50A		9,4	1,62	1,72	1,81	±8	0,97	10
M400-65A	0,65	4,0	1,52	1,62	1,72	±14	0,97	2
M470-65A		4,7	1,53	1,63	1,73	±12	0,97	5
M530-65A		5,3	1,54	1,64	1,74	±12	0,97	5
M600-65A		6,0	1,56	1,66	1,76	±10	0,97	10
M700-65A		7,0	1,57	1,67	1,76	±10	0,97	10
M800-65A		8,0	1,60	1,70	1,78	±10	0,97	10
M1000-65A		10,0	1,61	1,71	1,80	±10	0,97	10
M800-100A		1,00	8,0	1,56	1,66	1,75	±6	0,98
M1000-100A	10,0		1,58	1,68	1,76	±6	0,98	10
M1300-100A	13,0		1,60	1,70	1,78	±6	0,98	10

Tablo 1’de verilen çelik çeşitlerini veren kodlamalar Avrupa standartlarıdır. Ancak piyasada sıklıkla kullanılan benzetim yazılımlarının kütüphanesinde bulunan çelik malzemeler Amerikan standardı olarak bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı her iki standarta ait olan teknik verilerin bilinmesi gerekmektedir. Bu teknik verilerin çözümlenebilmesi için bu kodlandırmanın bilinmesine ihtiyaç vardır. Bu yüzden iki farklı standart arasındaki geçişler ve kodlandırmadaki şu bilgiler önemlidir:

- Avrupa standartındaki M koduyla başlayan ve üç haneli rakamdan oluşan kısım çeliğin üretim ham maddesinin farklılığından kaynaklanan gruplandırmasıdır.
- Amerikan standartında ise M koduyla başlayan ve iki haneli rakamdan oluşan kısım çeliğin üretim ham maddesi farklılığından kaynaklanan gruplandırmasıdır.

- Bu iki standart arasındaki geçişler şöyledir: Avrupa standartındaki M250 serisi Amerikan standartındaki M-15, M270 serisi M-19, M330-350 serileri M-36, M400 serisi M-43, M470 serisi M-45, M600 serisi ve üzerindeki M-47 ye karşılık gelmektedir.
- Mxxx-yyA şeklinde kodlanmış olan çelik çeşidindeki A harfinin solunda yer alan yy ile ifade edilen iki haneli rakam çelik sacın mm cinsinden kalınlık bilgisini vermektedir. Aynı bilgi Amerikan standartında yyG olarak ifade edilen G harfinin solunda bulunan iki haneli kod ile verilmektedir. 24G ifadesi 0,65 mm, 26G ifadesi 0,50 mm, 29G ifadesi ise 0,35 mm'dir.

Elektrik motoru imalatında kullanılan çelik saclar için Tablo 1'de belirtilen teknik özelliklerin yanında yüzeylerinin kaplama malzemelerini de bilmek gerekir. C0, C3, C4, C5 ve C6 tip kaplama çeşitleri mevcuttur. Bu kaplamalar ısı dayanımları ve kalınlıkları bakımından farklılık göstermektedir.

3. SERT MANYETİK MALZEMELER

Sert manyetik malzemeler olarak sabit mıknatıslar ilk olarak akla gelen malzemelerdir. Bunlar insanlık tarihi boyunca pek çok alanda farklı işlevlerle kullanılmışlardır. Sabit mıknatısların ilk olarak kullanımı 1930'lu yıllarda AlNiCo sabit mıknatıslarının bulunmasıyla başlamıştır. Bunları 1950'den sonra seramik ve sert Ferrit sabit mıknatıs malzemeleri izlemiştir. Bu malzemelerin ortaya çıkmasıyla sabit mıknatısların kullanım alanlarında artış yaşanmıştır. Bu artışla beraber yeni arayışlar hızlanmış ve 1960 yılında nadir toprak kalıcı mıknatısları ortaya çıkarılmıştır. Nadir toprak kalıcı mıknatıslar ilk olarak SmCo alaşımı içermektedir. Daha sonra bu alaşım yerini NdFeB alaşımına bırakmıştır. Günümüzde bu tip sabit mıknatıslar üzerine araştırmalar ve bu alaşımların geliştirmeleri devam etmektedir (Çabuk, 2016; Goll vd., 2014; Skomski vd., 2013; Yılmaz, 2005; Buschow, 1998; Bradley, 1971).

Sabit mıknatıslar hakkında detaylı bilgiye sahip olmak SMS motorlarının analizi ve tasarımı için faydalıdır. Bu mıknatısların özelliklerinde yer alan parametreler motor çıkış değerlerine oldukça büyük oranda etki etmektedir. Sabit mıknatısların daha iyi anlaşılabilmesi için bazı parametrelerin bilinmesi gerekir. Bu parametreler:

•“Br” Kalıcı Mıknatıslık: Kapalı manyetik devre içindeki doymuş mıknatısta ölçülen artık mıknatıslanma veya akı yoğunluğudur. Birimi Tesla (T) dir. CGS birim sisteminde ise Gauss (G) ile ifade edilir. Bugünlerde ticari nitelikteki nadir toprak mıknatıslarda kalıcı mıknatıslık 1,5 T'dir.

•“Hc” Gideren Alan Şiddeti: Kalıcı mıknatıslığı ortadan kaldıracak,

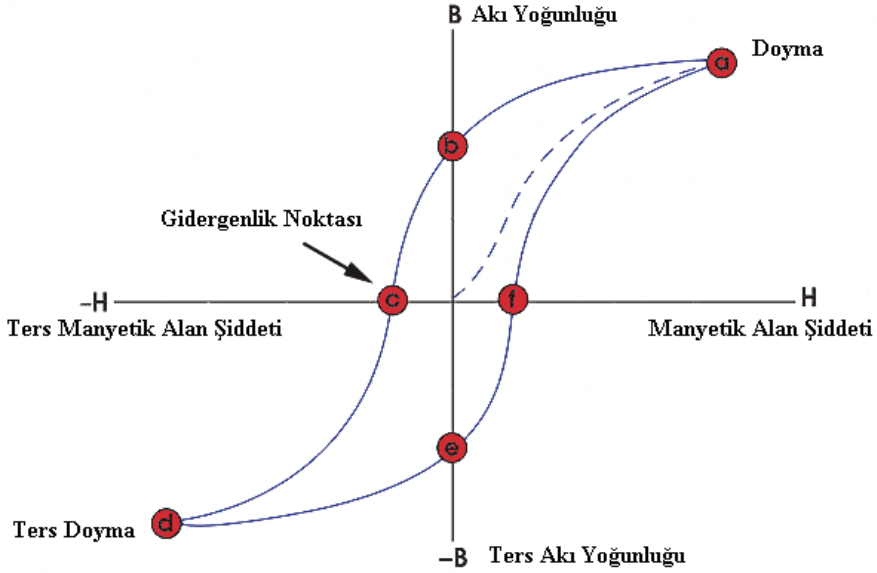
yeniden sıfıra getirmek için gerekli negatif manyetik alan gücüdür. Birimi kA/m dir. Gideren alan şiddetinin yüksek olması manyetizmayı giderme alanına karşı mıknatısın performansının daha iyi olmasına neden olur.

•“ μ ” Manyetik Geçirgenlik: Hemen hemen bütün manyetik malzemelerin manyetik geçirgenliği havanın manyetik geçirgenliğinden çok az büyüktür ($\mu_{\text{Hava}}=1$). Demir’in manyetik geçirgenliği ise bunların 1000 katı kadardır. Bu yüzden çoğu manyetik analizde demirin manyetik geçirgenliği sonsuz olarak kabul edilir.

•“BH” Enerji Çarpanı: En önemli olan parametredir ve mıknatıs içindeki depolanan enerjiyi gösterir. Birimi kJ/m³ dür. Depolanmış enerji arttıkça, yüksek değerli üretim elde edilmiş olur.

•“Tc” Curie Sıcaklığı: Manyetik malzemenin manyetizmasının kaybolduğu sıcaklık noktasıdır. Birimi °C dir.

Sabit mıknatısları SMS motoru içerisinde kullanmak için o malzeme-ye ait manyetik alan şiddeti ile akı yoğunluğu arasındaki ilişkinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Bu ilişkinin incelenmesinde malzemenin doyuma ulaştığı noktadaki manyetik alan şiddetinin bilinmesi gerekmektedir. Bununla birlikte doyuma ulaşıttan sonra manyetik alan şiddetinin düşürülmesi ile sıfıra ulaşıldığı durumdaki kalıcı mıknatıslık değerinde tespiti önemlidir. Ters yönde manyetik alan şiddeti artırılırsa gideren alan şiddeti değeri bulunur. Bu değere ulaşan malzeme mıknatıslık özelliğini yitirecektir. Manyetik ala şiddeti yeniden artırıldığında bir önceki işlemlerin simetriği olan bir eğri elde edilir. Bu eğriye “Histerezis Eğrisi” veya “BH Eğrisi” adı verilmektedir. Sabit mıknatısları BH eğrisi ile tanıyabiliriz ve Şekil 2’de görüldüğü gibidir (Ferraris vd.,2014; Rahman vd., 2014; Goll vd., 2014; Skomski vd., 2013; Yılmaz, 2005; Furlani, 2001).



Şekil 2. Sabit Miknatis Histerezis Eğrisi (Furlani, 2001)

Sert ferromanyetik malzemeleri diğer malzemelerden ayıran diğer bir özellik ortam koşullarına vermiş oldukları reaksiyondur. Özellikle ısıl etkilere karşı hassastırlar. Sabit miknatisların ısıl etkilerinin iyi anlaşılması için önemli bir parametre olan Curie sıcaklığının bilinmesi gerekir. Curie sıcaklığı her sert manyetik malzeme için ayrı bir sıcaklık değerini göstermektedir ve malzeme için belirlenmiş sıcaklık değerine erişen sabit miknatislar bütün miknatislanma özelliğini kaybeder. Bundan dolayı sert manyetik malzemeler için Curie sıcaklık değerlerinin bilinmesi ve buna göre o sıcaklık değeri altında çalıştırılmalıdır. Tablo 2’de sabit miknatis malzemeler için gerekli olan bazı ısıl parametreler verilmektedir. Bu tablodaki elde edilen veriler her miknatis grubu içinde bütün türlerin ilgili değerlerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Tablo 2 Miknatis malzemelerinde sıcaklık etkileri (Miller, 1989; Arnold ve Wang, 2009)

Miknatis Türü	Curie Sıcaklığı [°C]	α [%/K]	β [%/K]	Maksimum Çalışma Sıcaklığı [°C]
NdFeB	310	-0,13	-0,6	140
SmCo	720	-0,045	-0,25	250

AlNiCo	830	-0,02	0,01	500
Ferrit (Seramik)	450	-0,2	0,4	300

3.1. Alüminyum-Nikel-Demir

Sert manyetik malzeme olan sabit mıknatıslardaki ilk teknolojik gelişme 1931 yılında AlNiCo alaşımının Japonya’da keşfedilmesi ve manyetik özelliklerinin ortaya çıkartılıp analiz edilmesi ile başlamıştır. AlNiCo mıknatıslar alüminyum, nikel ve kobalt ile diğer elementlerin az miktardaki birleşiminden oluşmuştur. Bunların diğer ticari isimleri ise Aini, Alcomax, Hycomax, Columax ve Ticonal’dır. AlNiCo’ların bileşiminde %8-12 Al, %15-26 Nikel, %5-24 Kobalt, %6 ya kadar Bakır, %1 e kadar Titanyum ve dengeyi sağlayacak kadar Demir bulunur (Rahman vd., 2014; Goll vd., 2014; Skomski vd., 2013; Arnold ve Wang, 2009).

AlNiCo mıknatıslar kutupları arasında 0,15 T (1500 Gauss) manyetik alan kuvveti üretir. AlNiCo 5 ve AlNiCo 8 tipleri tercih edilir. AlNiCo 8 (eş yönsüz, %12 Kobalt) ve AlNiCo 5 (eş yönlü, %20–35 Kobalt) tipi mıknatıslar, düşük gideren manyetik alan şiddetine ve fazla kalıcı mıknatıslık özelliğine sahiptirler. Bundan dolayı bunları demanyetize etmek nispeten daha kolaydır. AlNiCo mıknatısların, manyetik özelliklerini kaybetmeye başladığı sıcaklık değerleri ise 830°C ve azami çalışma sıcaklığı 500°C’dir. Yüksek artık mıknatıslığa ve iyi termal kararlılığa sahiptirler. AlNiCo mıknatıslar korozyona karşı dayanımları oldukça yüksektir. Ancak bu tipteki sabit mıknatıslar, 450°C civarında bir sıcaklığa maruz kaldıklarında yüzeylerinde deformasyonlar (karamalar) ortaya çıkmaktadır. AlNiCo’nun mekaniksel dayanım gibi özellikleri oldukça zayıftır. Aşırı zorlanmalara karşı dayanımı az ve kırılmandır. AlNiCo tipi sabit mıknatıslar özellikle 1940 ile 1970 yılları arasında kalıcı mıknatıslı elektrik motoru endüstrisine hâkim olmuşlardır (Ferraris vd.,2014; Rahman vd., 2014; Goll vd., 2014; Skomski vd., 2013; Arnold ve Wang, 2009; Yılmaz, 2005; Furlani, 2001).

3.2. Ferrit (Seramik)

Ferrit mıknatıslar, 1950 yıllarında ortaya çıkan, ucuz, dayanıklı ve piyasada en çok bulunan mıknatıslardır. Bileşimlerinde demir oksit, baryum, stronsiyum, karbonat bulunur ve seramik işlem teknolojisi kullanılarak kolay işlenebilmesi sağlanan mıknatıslardır. Ferrit mıknatıslar AlNiCo mıknatıslardan daha kuvvetlidir, ama NdFeB ve SmCo mıknatıslardan daha

zayıftır. Ayrıca daha düşük maliyetlidir. Bu malzemeler AlNiCo'lara göre daha düşük Curie sıcaklık değerine sahiptirler. 450°C'lik Curie sıcaklık değerine ve 300°C'lik en yüksek işletme sıcaklık değerine sahiptirler. Mekanik yapıları nispeten daha yumuşaktır. Seramik mıknatısların maksimum manyetik alan kuvveti 0,35 T ve manyetik alan şiddeti yaklaşık 30 ila 60 kA/m dir (Goll vd., 2014; Arnold ve Wang, 2009; Furlani, 2001).

Seramik mıknatıslar yüksek basınçla ve sinterlenerek üretilmektedirler. Seramik mıknatıslar eş yönlü ve eş yönsüz olarak imal edilmektedir. Seramik 1 sınıfı mıknatıslar bütün yönlerde eşit manyetik özellikleri olan bir eş yönlü sınıfıdır. Seramik sınıflardan 5 ve 8 eş yönsüz sınıfıdır. Eş yönsüz mıknatıslar baskı yönünde manyetize olurlar. Bununla birlikte Ferrit sabit mıknatısların yüzeyleri pürüzsüz ve oksidasyona rastlanmaz (Ferraris vd.,2014; Rahman vd., 2014; Goll vd., 2014; Skomski vd., 2013; Arnold ve Wang, 2009; Yılmaz, 2005; Furlani, 2001). Otomotiv endüstrisinde küçük doğru akım motor (fan, cam silecekleri, pompa... vb) olarak ve elektrikli oyuncaklarda sabit mıknatıslı motorlarda kullanılmaktadır.

3.3.Samaryum-Kobalt

SmCo mıknatıs nadir toprak elementlerden oluşmuştur. SmCo mıknatıslara sinterlenerek ya da sıkıştırılıp bir araya getirilerek üretilirler. Sinterleme yöntemi malzemelerin toz parçacıkları haline getirilip bunların yüksek basınç altında şekillendirilmesi ve yüksek manyetik alana maruz bırakılıp kalıcı olarak mıknatıs özelliğine sahip olması teknolojisidir. Günümüzde sıklıkla kullanılan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu mıknatıslar yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir. Aynı zamanda demanyetizasyon eğrileri lineer özellik taşımaktadır. Ancak diğer türlere göre daha az mevcut oldukları için yüksek fiyata sahiptirler. 720°C'lik Curie sıcaklığına sahiptir ve en yüksek işletme sıcaklık değeri ise 250°C'dir (Goll vd., 2014; Arnold ve Wang, 2009; Furlani, 2001).

SmCo olarak adlandırılan toprak mıknatıslar, SmCo₅ ve Sm₂Co₁₇ olarak iki tiptedir. SmCo₅ ve Sm₂Co₁₇ toprak mıknatısları birincil ve ikincil nesil toprak mıknatıslarını oluşturmaktadır. SmCo5 karışık olmayan bir alaşımdır. Çok daha karmaşık yapıya sahip olan Sm₂Co₁₇ daha gelişmiş malzemelerin alaşımı olup, daha güçlü bir başarıma sahiptir (Çabuk, 2016; Yılmaz, 2005). Gideren alan şiddetini yükseltmek için, alaşımlar SmCoCu şeklinde de üretilirler.

SmCo mıknatıslar çok yüksek manyetik özelliklere, çok iyi termal kararlılığına ve dirence sahip olup aşınma ve oksitlenmeye karşı dayanımlıdır. Bu özelliklerinden dolayı SmCo mıknatısları geniş bir aralığa sahip sıcaklık değerlerinde ve ortam direnci ihtiyacı olan uygulamalar için uygundur (Ferraris vd.,2014; Rahman vd., 2014; Goll vd., 2014; Skomski vd., 2013; Arnold ve Wang, 2009; Yılmaz, 2005; Furlani, 2001).

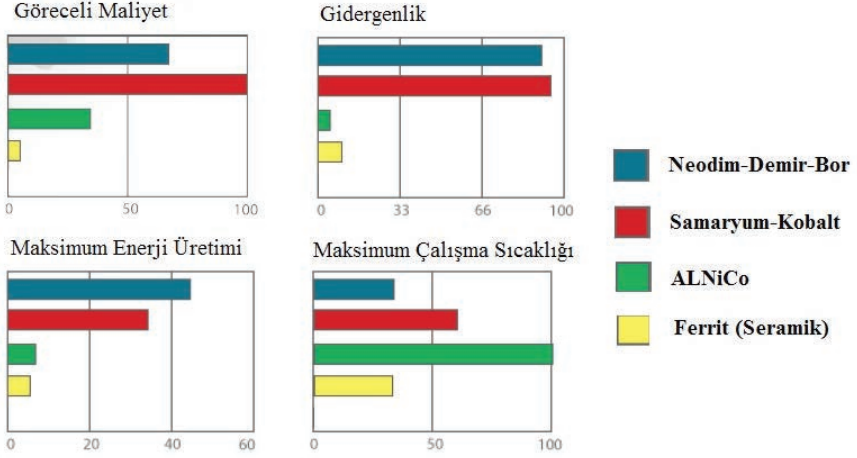
3.4. Neodim-Demir-Bor

Günümüzde gerek manyetik özellikleri gerekse ulaşılabilir olmasından dolayı sabit mıknatıslar arasında en fazla tercih edilen kalıcı mıknatıs çeşidi NdFeB tipidir. Bu sabit mıknatıslar kullanıma başlandığı ilk yıllarda büyük güç gerektiren ve yüksek artık mıknatıslılığı giderici kuvvet etkisine sahip olacak şekilde geliştirilmişlerdir. NdFeB mıknatıslar üretim yöntemlerine göre; sinterleme, polimer bağlama ve ısı deformasyonu olarak üç şekilde sınıflandırılırlar. Sinterlenmiş NdFeB mıknatıslar, yüksek enerji verimliliği ve iyi maliyet performansı gibi üstün özelliklere sahiptir. $Nd_2Fe_{14}B$ mıknatısı 512 kJ/m^3 değerinde en yüksek enerji yoğunluğundadır. Sinterlenmiş olan NdFeB mıknatıslar çevresel kararlılık ve ısıl etkilerden kaynaklı bazı dezavantajları vardır. Bunların Curie sıcaklığı yaklaşık 310°C ve maksimum çalışma sıcaklığı 140°C 'dir (Ferraris vd.,2014; Çabuk, 2016; Yılmaz, 2005; Furlani, 2001). Bu tip mıknatıslarda sıcaklık değişimiyle akı yoğunluğunda gözle görülebilir bir değişim vardır.

Neodim malzemesi, samaryum malzemesi ile karşılaştırıldığında daha çok elde edilebilen bir malzemedir. NdFeB mıknatıslar SmCo mıknatıslar ile kıyaslandığında yüksek sıcaklıklar için uygun değildir. Bununla beraber bunlar korozyona karşıda dayanımları pek yoktur (Ferraris vd.,2014; Rahman vd., 2014; Yılmaz, 2005; Furlani, 2001; Goll vd., 2014; Skomski vd., 2013; Arnold ve Wang, 2009). İyi ve kötü özellikleri kıyaslandığında NdFeB belirtilen pek çok özelliğinden dolayı en yaygın olarak kullanılan ve tercih edilen sabit mıknatıslardan birisidir ve gelecekteki uygulamalara da yön vereceği düşünülmektedir.

4. SMS MOTORLARDA KULLANILAN SABİT MIKNATISLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

SMS motorlardaki sabit mıknatısların seçiminin nasıl yapılması gerektiği, hangi yapıdaki motor için hangi mıknatıs türünün uygun olabileceğine karar verebilmek için Şekil 3'deki göreceli maliyet durumlarının, maksimum enerji değerlerinin, gidergenlik ve çalışma durumundaki ısıl reaksiyonlarının karşılaştırmalarına bakmak yeterli olabilir. Şekil 3'deki bu karşılaştırma yüzdelik olarak verilmiştir.



Şekil 3. Çeşitli sabit mıknatısların karşılaştırılması (Sura Magnets, 2021)

Sabit mıknatısların karşılaştırılması sonucunda aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Birçok ticari uygulamalarda maliyet birincil hedef olarak yansımaktadır. Bu tip bir SMS motoru imalat hedefinde düşük akı yoğunluğu da isteniyorsa SmCo ve ferrit mıknatıslar düşünülmelidir. Ancak çalışma sıcaklığının fazla olması ön görülen imalatlarda ise ALNiCo mıknatıslar önerilmektedir.

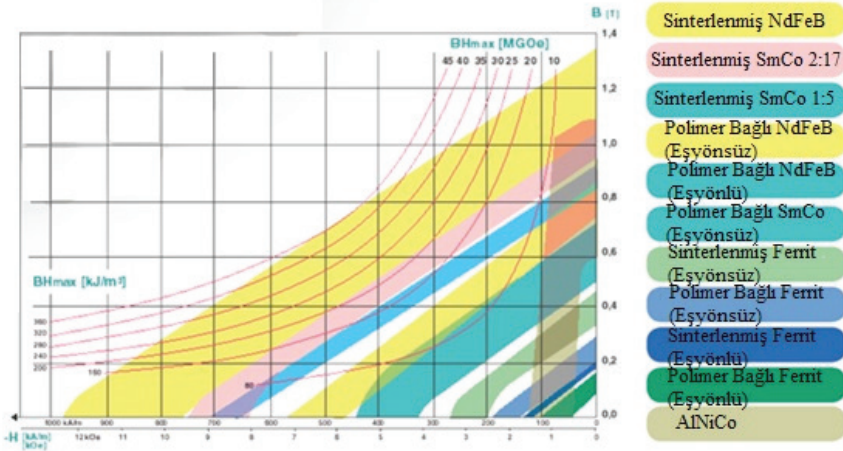
- Bazı ticari üretimlerde maliyet birincil hedef değildir ve yüksek akı yoğunluğu ile performansı yüksek bir SMS motoru hedeflenmektedir. Bu tip uygulamalarda NdFeB sabit mıknatıslar tercih edilmektedir.

- Gidergenlik durumlarının önemli olduğu ve bu parametrenin ön planda olduğu imalatlarda NdFeB ve SmCo mıknatıslar ön plana çıkmaktadır. Gidergenlik değerlerinin önemsiz olduğu ancak yüksek çalışma sıcaklıklarına maruz kalacak uygulamalarda kullanılacak durumlar için ALNiCo sabit mıknatıslar önerilmektedir.

- Ağır şartlar olarak nitelendirilebilecek bazı uygulamalarda maksimum enerji üretimi değerinin yüksek olması istenmektedir, bu tip uygulamalarda NdFeB ve SmCo mıknatısların kullanılması motorun uzun ömürlü olmasına etki edecektir.

Sabit mıknatısları kendi arasında kıyaslarken sadece Şekil 3'de verilen parametreler bazı uygulamalar için yeterli olmayabilir. Belirtilen bu parametrelerin yanında mıknatısların histerezis eğrilerine de bakmak gerekir. Bu karakteristik öz eğrilerinde görüleceği gibi mıknatısların çalışma özellikleri kalıcı mıknatıslığının ve uygulanan ters alanla ne kadar etkilenip değiştiği ile belirlenir. Bundan dolayı histerezis

eğrilerindeki mıknatıslama karakteristiğinin ikinci bölgesi analiz edilerek mıknatıs hakkında gerekli olan teknik bilgi edinilir. Bu karakteristiğe ise demanyetizasyon karakteristiği adı verilir. SMS motorlarda çoğunlukla tercih edilen sabit mıknatısların demanyetizasyon eğrileri Şekil 4’de verildiği gibidir.



Şekil 4. Çeşitli sabit mıknatısların demanyetizasyon eğrileri (Sura Magnets, 2021)

Demanyetizasyon eğrilerindeki sabit mıknatısların durumları inceleyerek ters manyetik alana maruz kalabilecek olan yapılarda tercih edilmesi gereken mıknatıslar ya da kullanılmaması gereken mıknatıslar anlaşılabilir. Şekil 4’deki eğrilere göre NdFeB mıknatısların demanyetizasyon değeri bakımından öne çıktığını ve SmCo mıknatıslarında bu tip bir çalışma durumunda en az NdFeB kadar önemli bir mıknatıs olduğu görülmektedir. Ancak göz ardı edilmemesi gereken konu karşılaştırmalar yapılırken sabit mıknatısların hangi koşullarda ve ne tip bir uygulamada yer alacağıdır. Unutulmaması gereken ve mıknatıs seçiminde asıl önemli olan parametre nerede, hangi şartlar altında ve hangi işlevleri yerine getirecekleridir.

Tablo 2 ve Şekil 3-4’deki veriler göz önüne alındığında uygulamalarda en çok tercih edilen Alüminyum-Nikel-Demir, Ferrit (Seramik), Samaryum-Kobalt ve Neodim-Demir-Bor sabit mıknatısları için karşılaştırma Tablo 3’deki gibidir. SMS motorlarda kullanılan sabit mıknatısları belirlerken motorun maruz kalacağı bütün koşullar iyi analiz edilmelidir. Tasarım esnasında bazı ön görüleri yapılmalıdır. Uygun olmayan bir seçim ile motor ömrünün düşürüldüğü ve hedeflenen çıkış değerlerine erişilmesinin güçleşeceği unutulmamalıdır. Çoğu SMS motor tasarımcısı ve imalatçısı Tablo 3’deki verilerden maksimum enerji çarpanı üzerine yoğunlaşmaktadır. Maksimum enerji çarpanı ile çok daha yüksek çıkış değerine sahip bir SMS motoru elde edileceği ön yargısı vardır. Ancak SMS motorun

kullanılacağı uygulamanın durumuna göre Curie sıcaklığı, gideren alan şiddeti ve kalıcı mıknatıslık değerlerinde önemi büyüktür. Bu tablodaki karşılaştırmalar birim yüzey için gerçekleştirilmiştir. Sabit mıknatısların tasarımcılar tarafından belirlenen büyüklük, şekil ve dizilimleri de SMS motoru çıkış değerine etki edecektir. Bu bağlamda sadece mıknatısların özelliklerinin karşılaştırması yeterli olmayacağı hatırlanmalıdır.

Tablo 3 Sabit mıknatısların karşılaştırılması (Miller, 1989; Arnold ve Wang, 2009)

Sabit Mıknatıs Çeşiti	B_r [T]	H_c [kA/m]	BHmax [kJ/m ³]	T_{coef} [°C]	T_{max} [°C]	T_{curie} [°C]
Nd ₂ Fe ₁₄ B (Sinterlenmiş)	1,0-1,4	750-2000	200-440	-0,12	150	310-400
Nd ₂ Fe ₁₄ B (Bağlanmış)	0,6-0,7	600-1200	60-100	-0,12	150	310-400
SmCo ₅ (Sinterlenmiş)	0,8-1,1	600-2000	120-200	-0,04	300	720
Sm(Co,Fe,Cu, Zr) ₇ (Sinterlenmiş)	0,9-1,15	450-1300	150-240	-0,04	300	800
AlNiCo (Sinterlenmiş)	0,6-1,4	275	10-88	-0,02	540	700-860
Sr-Ferrite (Sinterlenmiş)	0,2-0,4	100-300	10-40	-0,2	300	450

KAYNAKLAR

- Arnold, D.P. ve Wang, N. (2009), Permanent Magnets for MEMS, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18(6), 1255-1266. doi: 10.1109/JMEMS.2009.2034389.
- Bradley F.N. (1971), *Materials for Magnetic Function*, New York: Hayden Book Company Inc.
- Buschow K.H.J. (1998), *Permanent-Magnet Materials and Their Applications*, Zuerich: Trans Tech Publications Ltd.
- Çabuk, A. S. (2016), *A Novel Approach to Optimized Design of In-Wheel BLDC Motors* Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp\(425881\)](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp(425881))
- Erdemir Romania Grubu (2021), *Ürün Kataloğu (Çelik Üretimi)*, 03.05.2021. http://www.erdemir.ro/Sites/1/upload/files/catalog_ErdemirRomania.pdf
- Ferraris L, Franchini F., Poskovic E., and Tenconi A. (2014), Impact of a Bonded-Magnet Adoption on a Specific Fractional Motor Power and Efficiency, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(5), 3249-3257.
- Furlani E.P. (2001), *Permanent Magnet and Electromechanical Devices Materials, Analysis and Applications*, San Diego: Academic Press.
- Gieras, J.F. (2010), *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, Oxfordshire: Taylor and Francis Group.
- Goll, D., Loeffler, R., Herbst, J., Karimi, R., Pflanz, U., Stein, R. ve Schneider, G. (2014), High-Throughput Methods for Searching New Permanent Magnet Materials, *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(11), 1-7. doi: 10.1109/TMAG.2014.2331458.
- Sura Magnets (2021), *Guide to Magnetic Materials*, 19.07.2021. <http://suramagnets.se/wp-content/uploads/>
- Jin, Z., Yang, J., Qiu, X., Ge, H. ve Bai, C. (2021), A High Torque Estimation Accuracy Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on a Novel Iron Loss Resistance Observer, *IEEE Access*, 9, 125822-125829. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3111439.
- Lee, J. ve Lim, D. (2021), A Stepwise Optimal Design Applied to an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Traction Applications, *IEEE Access*, 9, 115090-115099. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3105119.
- Miller, T.J.E. (1989), *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, New York: Oxford University Press.

- Pellegrino, G., Jahns, T.M., Bianchi, N., Soong, W.L. ve Cupertino F. (2016), *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet*, Switzerland: Springer International Publishing.
- Rahman M. M., Kim K. ve Hur J. (2014), Design and Optimization of Neodymium-Free SPOKE-Type Motor With Segmented Wing-Shaped PM, *IEEE Transactions On Magnetics*, 50(2), 865-868. doi: 10.1109/TMAG.2013.2282151.
- Skomski, R., Manchanda, P., Kumar, P., Balamurugan, B., Kashyap, A. ve Sellmyer, D. J. (2013), Predicting the Future of Permanent-Magnet Materials, *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(7), 3215-3220. doi: 10.1109/TMAG.2013.2248139.
- Sweetnam R. T. (2013), Microscopic origins of diamagnetic, ferromagnetic and paramagnetic magnetization, *1st Annual Active and Passive RF Devices Seminar*, 41-42. doi: 10.1049/ic.2013.0247.
- Vinga, C., Cazacu, E., Frigura-Iliasa F. M. ve Vatau, D. (2017), Educational model for diamagnetic material applications in micro and nano levitation devices, *16th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)*, 1-4. doi: 10.1109/ITHET.2017.8067809.
- Waheed, A. ve Ro, J. (2020), Analytical Modeling for Optimal Rotor Shape to Design Highly Efficient Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE Access*, 8, 145672-145686. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014718.
- Wu Q. ve Pang, Y. (2013), Research on model on relative permeability and magnetic induction intensity of ferromagnetic material, *2013 Chinese Automation Congress*, 888-893. doi: 10.1109/CAC.2013.6775858.
- Yılmaz, M. (2005), *Fırçasız Doğru Akım Motorunun Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Bölüm 21

KENEVİR ELYAFIN ÖZELLİKLERİ VE KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Yalçın BOZTOPRAK¹

¹ Asst. Prof. Dr. Yalçın BOZTOPRAK, Marmara University, Faculty of Technology, Metallurgy and Materials Engineering, Göztepe Campus, Istanbul / Turkey, yboztoprak@marmara.edu.tr

GİRİŞ

Kompozit malzemeler, kullanımını gittikçe yaygınlaşan ve günümüzde sürekli olarak yeni malzemeler ortaya çıkmasına sebep olan malzemelerden biridir. Kompozit malzeme uygulamaları, yeni pazarlar oluşturarak ve geleneksel metal alaşımların yerini alarak istikrarlı bir şekilde büyümektedir. Hafifliği ve yapısal ve sağlamlık yönünden herhangi bir ödün vermeden farklı şekiller oluşturmada çok yönlülüğü nedeniyle otomobil, havacılık, savunma, inşaat endüstrilerinde ve daha birçok sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin en yaygın şekli metal kompozitler, seramik kompozitler, polimer kompozitler ve kompozit yapı (sandviç panel vb) malzemeleridir. Genel olarak kompozitler, matris ve matrisin genel mekanik özelliklerini geliştirmek için elyaf formunda eklenen takviyeden oluşur. Bir kompozitin performansı, matris ve elyafların seçimine ve özelliklerine bağlıdır.

Sentetik lifler, geleneksel olarak kompozit üretiminde kullanılmaktadır. Sürdürülebilirliğe yönelik çevre bilincinin ortaya çıkmasıyla birlikte polimer liflerin kullanımından bitki liflerine doğru bir kayma yaşanmaktadır. Tarımsal atıklardan elde edilen doğal liflerin dünya çapındaki mevcudiyeti nedeniyle, sürdürülebilir malzemeler için yeni malzemelerin üretimine yönelik mühendislik araştırmaları ortaya çıkmıştır. Doğal lifler çevre dostudur [1], miktar olarak boldur, işleme ekipmanları için aşındırıcı değildir ve düşük yoğunluk, düşük maliyet, yüksek derecede esneklik, özgül mukavemet ve modül gibi dikkate değer özellikler sergiler.

Çevre koruma, mevcut neslin karşılaştığı en büyük zorluklardan biridir [2, 3]. Artan çevresel kaygı ve koruma nedeniyle, termoset ve termoplastik kompozitlerin geliştirilmesinde doğal liflerin potansiyel kullanımı ve fiziksel ve kimyasal yüzey işlemleri yoluyla mekanik performanslarının iyileştirilmesi ile ilgili mevcut çalışmaların sayısı gittikçe artmaktadır. Ayrıca doğal lifler, cam lifleri gibi sentetik liflerin olası alternatif ikameleri olarak daha fazla ilgi görmektedir [4-7].

Doğal elyaf üretimi, cam elyafı üretimine göre ortalama % 60 daha az enerjiye ihtiyaç duyar ve daha düşük hava emisyonu sağlar [8]. Ayrıca atıklar çoğunlukla organiktir ve % 100 biyolojik olarak parçalanabilir [9]. Polimer matrislerin takviyesi olarak kullanılan doğal lifler, son yıllarda yoğun bir şekilde araştırılmakta ve otomotiv, inşaat, spor, mobilya, havacılık, ambalaj endüstrilerinden balistik zırha kadar çok çeşitli uygulamalar için değerlendirilmektedir.

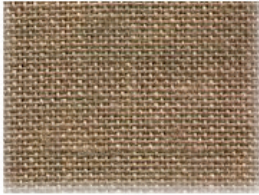
Doğal liflerin kullanılmasının çok sayıda faydası olduğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Doğal liflerin en büyük dezavantajları; kalıtsal hidrofilik karakterleri, yüksek oranda anizotropik yapıları, düşük termal kararlılıkları, mekanik özelliklerde değişiklik ve sentetik liflerden

daha düşük mekanik özelliklere sahip olmalarıdır [10-12]. Ayrıca doğal liflerin büyüme durumu, hasat yöntemleri ve olgunluk gibi çeşitli yönlerin genellikle doğal lif özelliklerini etkilediği kabul edilmektedir.

Doğal lifler farklı yenilenebilir kaynaklardan elde edilir ve genellikle kökenine göre bitkisel, hayvansal ve mineral lifler olarak sınıflandırılır. Tablo 1, doğada farklı formlarda bulunan doğal liflerin sınıflandırılması hakkında bilgi vermektedir. Bitki liflerinin yapısal bileşenleri, selüloz ve düşük miktarlarda hemiselüloz, lignin (amorf), pektin, vaks ve kül içerir (Tablo 2).

Tablo 1. Doğada farklı formlarda bulunan doğal liflerin sınıflandırılması [12,13]

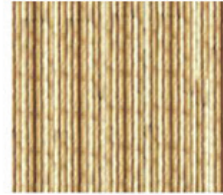
Ağaç Lifi	Sap Lifi	Meyve Lifi	Tohum Lifi	Yaprak Lifi	Bast Lifi
Sert ağaç	Bambu	Hindistan cevizi	Pamuk	Sisal	Kenevir
Yumuşak ağaç	Buğday	Hurma	Palmiye tohumu	Manila	Jüt
Ağaç talaşı	Pirinç		Kapok	Muz	Rami
	Arpa		Yonca (Alfalfa)	Hurma ağacı	Keten
	Mısır			Abaka	Kenaf Hint kamışı Şeker kamışı Bamya çiçeği (Roselle)



JÜT



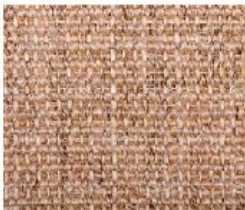
HİNDİSTANCEVİZİ



BAMBU



KENEVİR



SİSAL



KETEN

Şekil 1. Doğal elyaflara örnekler

Tablo 2. Bitkisel liflerin kimyasal kompozisyonu [9, 14, 15]

Elyaf Türü	Kökene (%)	Selüloz (%)	Hemiselüloz (%)	Lignin (%)	Pektin (%)	Mum (%)	Kül (%)	Mikrofibriler Açığı (°)
Kenevir	Bast	70-74	15-20	3.5-5.7	0.8	1.2-6.2	0.8	2-6.2
Jüt	Bast	61-72	18-22	12-13	0.2	0.5	0.5-2	8
Sisal	Yaprak	78	10	8	---	2	1	---
Keten	Bast	64-72	18-20	2-2.2	1.8-2.3	---	---	5-10
Rami	Bast	69-91	5-15	0.4-0.7	1.9	---	---	7.5
Harakeke (Yeni Zelanda keteni)	Yaprak	56-64	23-31	7.8	---	---	---	---
Hindistan cevizi lifi	Meyve	36-43	41-45	0.15-0.25	3-4	---	---	30-49
Kenaf	Bast	45-57	8-13	22	0.6	0.8	2.5	2-6.2

Mikrofibriler açığı, mikrofibrillerin fiber eksenine göre yaptıkları açıdır [16]. Genellikle daha yüksek mukavemete ve Young modülüne sahip doğal lifler, kenevir lifinde olduğu gibi daha yüksek bir selüloz içeriğine, daha uzun bir hücre uzunluğuna ve daha düşük bir mikrofibriler açığına sahiptir. Doğal liflerin bozunması, kimyasal bileşime bağlıdır; lignin esas olarak UV'den sorumludur, hemiselüloz ise biyolojik bozunmadan, termal bozunmadan ve yüksek nem absorpsiyonundan sorumludur.

Tablo 3, doğal elyafların ve cam elyafın (E camı) fiziksel ve mekanik özelliklerini göstermektedir. Doğal liflerin cam liflere göre düşük yoğunluk ve daha yüksek özgül rijitlik gibi bazı avantajları olduğu görülmektedir. Keten, kenevir ve rami lifleri; mukavemetleri cam elyaftan daha düşük olmasına rağmen en yüksek Young modülüne ve spesifik rijitliğe sahiptir. E-camına benzer bir ortalama performans elde etmek için ramiden daha güçlü ve E-camdan daha rijit olan kenevirin seçilmesi makul bir seçim olacaktır.

Tablo 3. Doğal elyafların ve cam elyafın (E camı) fiziksel ve mekanik özellikleri [2, 9, 15, 17]

Elyaf Türü	Uzunluk (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Kopma Uzaması (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Young Modülü (GPa)	Nem İçeriği (%)	Özgül Rijitlik (E/ρ) (GPa)
Kenevir	5-55	1.4	1.6	550-1110	30-70	8	21-50
Jüt	2-120	1.3-1.5	1.5-1.8	393-800	10-55	12	6-34
Sisal	900	1.3-1.5	2.0-2.5	507-855	9.4-28	11	6-18
Keten	5-900	1.5	1.2-3.2	345-1830	27-80	7	18-53
Rami	900-1200	1.5	2.0-3.8	400-938	44-128	12-17	29-85
E Camı	Sürekli	2.5	2.5	2000-3000	70	< 0.1	28

Doğal liflerin mekanik özellikleri; fiziksel, kimyasal ve morfolojik özelliklerinin yanı sıra yetiştirme koşullarına, hasat zamanına, ekstraksiyon yöntemine, işleme ve depolama prosedürlerine de bağlıdır [2, 18]. Pickering ve arkadaşları [19], ortalama gerilme mukavemeti 857 MPa ve Young modülü 58 GPa olan ve optimum hasat süresi 114 gün olarak bulunan kenevir lifinin (Yeni Zelanda’da yetiştirilmiş) hasat süresinden sonra 5 gün içinde mukavemetinin % 15 oranında azaldığını belirtmişlerdir.

1. KENEVİR ELYAF

Kenevir, yenilenebilir kaynaklar trendine güçlü bir şekilde uyduğu için dünyanın doğal yapısında devrim yapma şansına sahip bir malzemedir. Negatif bir karbon ayak izine sahiptir, çünkü büyümesi sırasında yüksek oranda karbondioksit emer. Yüksek ısı yalıtımına, ısı depolama özelliğine, buhar geçirgenliğine sahiptir, söküm sonrası gübre olarak kullanılabilir ve % 100 bozunabilir [20].



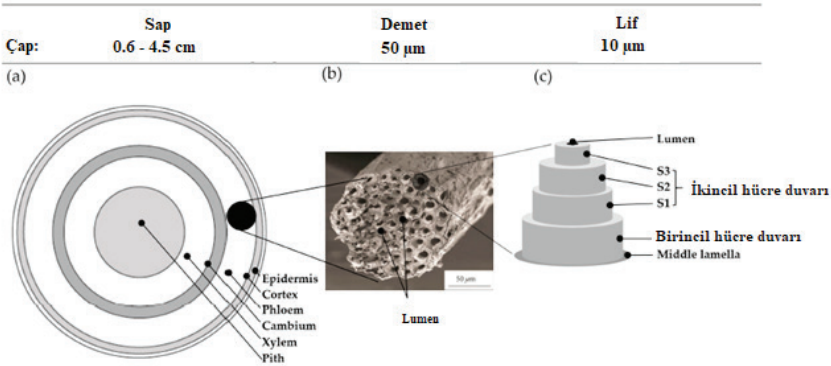
Şekil 2. Kenevir lifinin dönüşüm aşamaları [21]

İyi bilinen doğal lifler arasında kenevir lifi, çok eski tarihlerde tekstil, kağıt imalatı (İncil’in ilk kopyalarında kenevir kağıdı kullanılmıştır) ve hatta ilaç endüstrisi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Arkeolojik olarak kenevir, keşfedilen en eski doğal elyaftır. “Columbia History of the World”, doğal elyaftan yapılmış ürünlere ait en eski kalıntıların, MÖ 8000’e kadar uzanan mezarlarda keşfedilen kenevir kumaş parçaları olduğunu belirtmiştir [22]. Yakın zamandan örnek verecek olursak Henry Ford, 1941’de otomotiv endüstrisinde kenevir elyaf takviyeli polimer kompozitleri uygulamıştır. Diğer bir örnek, 2008 Pekin Olimpiyatları sırasında tesislerin pencere çerçeveleri ve yer döşemeleri gibi konstrüktif detaylarında kenevir elyaf takviyeli polimer kompozitlerin kullanılmış olmasıdır.

Endüstriyel kenevir lifi Cannabis Sativa bitkisi, bazı ülkelerdeki kısıtlamaların ardından günümüzde birçok ülkede yetiştirilmektedir. Neredeyse tüm ılıman ve tropikal ülkelerde yetiştirilmesine rağmen Hindistan ve İran’a özgüdür. Rusya, yıllık dünya üretiminin yaklaşık %33’ünü oluş-

turan en büyük kenevir lifi üreticisidir. Fransa, Almanya, İtalya, Yugoslavya, Şili, Çin, Japonya ve Peru gibi diğer ülkeler de önemli miktarlarda kenevir lifi üretmektedir [23]. Ülkemiz de son yıllarda endüstriyel kenevir üretimine yaptığı yatırımlarla dünya kenevir üreticileri arasında yerini almıştır. Avrupa ve Kanada'da yetiştirilen Cannabis Sativa'da Avrupa'da % 0,2'den, Kanada'da % 0,3'ten fazla tetrahidrokanabinol (THC) içermemesi zorunluluğu vardır [2, 24].

Kenevir lifinin enine kesiti, uzunluğu boyunca sabit olmayan düzensiz bir şekle sahiptir. Floem (Şekil 3a), bitki sapının tüm uzunluğu boyunca uzanan ve yaklaşık olarak %70-74 selüloz, %15-20 hemiselüloz, % 3,5- 5,7 lignin, % 0,8 pektin ve % 1,2-6,2 mum içerir. Floem ayrıca kambiyumdan kaynaklanan ikincil bast lifleri içerir. Kenevir lifi çok hücreli bir yapıya sahiptir ve yan yana çok sayıda lümen içeren kompozit bir malzeme olarak görülebilir (Şekil 3b). Kenevir lifinin tipik bir temel lif yapısı Şekil 3c'de gösterilmektedir. Kenevir lifinin hücre duvarı çok katmanlıdır ve birincil hücre duvarı olarak adlandırılan (hücre gelişimi sırasında biriken ilk katman) ve üç katmandan oluşan ikincil duvardan (S1, S2, S3) oluşur. Temel lifler orta lamelde lignin ile birbirine bağlanır (lignin konsantrasyonu yaklaşık %90'dır). Öte yandan maksimum selüloz konsantrasyonu, yaklaşık % 50 oranında S2 katmanındadır. S2, aynı zamanda en kalın katmandır ve daha yüksek selüloz konsantrasyonu nedeniyle lif özelliklerini kontrol eder [2].



Şekil 3. Kenevir lifinin yapısı: (a) enine kenevir sapı bölümü, (b) kenevir lifi demetinin enine kesit morfolojisi ve (c) kenevir temel lifinin şematik tasviri

Diğer doğal liflerde olduğu gibi kenevir de hidrofilik karaktere sahiptir. Hidrofiliklik, matris ile lif arasında zayıf ara yüzey etkileşimine ve zayıf lif dağılımına, lif şişmesine ve matris-lif ara yüzeyinin ayrılmasına yol açabilen yüksek nem emilimi ile sonuçlanır [25]. Kenevirin yapısında bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin, yapılarında hidrofilik hidroksil grupları taşır. Atmosferden gelen nem, su molekülleri ile yeni hidrojen bağları oluşturmak için bu hidroksil gruplarıyla temas edebilir. Pektin ve

mumsu maddeler bu su moleküllerini tutar ve serbest hidroksil gruplarının polar matris ile bağ oluşturmak üzere reaksiyona girmesini engeller. Sonuç olarak, fiber ve matris arasında zayıf bir ara yüzey bağı oluşur. Bu problem, liflerin yüzeyindeki hidrofilik hidroksil gruplarını azaltmak için uygun kimyasallarla yüzey modifikasyonu yapılmasıyla aşılabılır. Alkalın, silan ve asetilasyon gibi kimyasallar, lifin hidrofilik hidroksil grupları ile reaksiyona girebilir ve böylece hidrofobik özellikleri iyileştirebilir ve matris ile daha iyi bir bağlanmayı kolaylaştırabilir [26].

Kenevir lifleri, kompozit malzemelerde genellikle cam liflerinin yerini alan takviye malzemesi olarak kullanılabilir. Kenevir bitkisinin kabuğunda bulunan bu lifler, cam liflerinininkiyle karşılaştırılabilir belirli bir mukavemet ve sertliğe sahiptir [27]. Gerçekten de mekanik özelliklerle ilgili olarak yapısında nispeten daha büyük miktarda selüloz ve hemiselüloz (~%90) bulundurması ve daha düşük mikrofibriller açığı ($6,2^\circ$) sahip olması sebebiyle kenevir lifi, dikkate değer bir gerilme mukavemeti (270-1040 MPa), elastik modül (20-70 GPa) ve toplam uzamaya (%1,6-4,0) sahiptir [5]. Bu nedenle sisalden sonra kenevir, kompozitlerde takviye olarak dünyanın en çok uygulanan doğal elyafıdır [28].



Şekil 4. Kenevir elyaf takviyeli kompozitlerin kullanım alanlarına örnekler [29-32]

2. KENEVİR TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Son zamanlarda havacılık, otomotiv, ulaşım, bahçe mobilyaları, inşaat, spor, eğlence ve diğer seri üretim endüstrilerinde üreticiler, sürdürülebilir ve yenilenebilir takviyeli kompozitlere odaklanmıştır [33]. Termoset ve termoplastikler için takviye olarak jüt, keten, kenevir, hindistan cevizi ve sisal gibi doğal lifler üzerinde son on yıldan beri birçok araştırma yapılmıştır.

Enjeksiyon, ekstrüzyon, sıcak pres gibi yöntemler termoplastik matrisli kompozit üretiminde kullanılan yöntemlerdendir. Termoplastik matrisli ve doğal elyaf takviyeli kompozit malzemeler de bu yöntemlerle üretilir. Sıcak presleme genellikle gevşek kırılmış liflerle veya kısa veya uzun lifli keçelerle yapılır. Hem lif tipi hem de matris dikkate alınarak viskozite, basınç, tutma süresi ve sıcaklık kontrol edilerek kenevir takviyeli kompozitler üretilir.

En çok çalışılan termoplastik matrisler polipropilen (PP), polietilen (PE), polistiren (PS) ve polilaktik asit (PLA). Polipropilen, diğer termoplastik matrislere kıyasla düşük yoğunluğu, düşük maliyeti, işlenebilirliği, gerilme mukavemeti ve ısı ve korozyon direnci nedeniyle doğal elyaf kompozitler için en çok tercih edilen matristir. PP'nin hidrofobik, kenevir liflerinin ise hidrofilik yapıda olmasından dolayı ara yüzey yapışmasında sorunlar ortaya çıkmaktadır, bu da her ikisi arasında etkisiz bir gerilme transferine yol açabilir. Polipropilen ile birlikte maleiklenmiş polipropilen (MAPP) gibi uyumlaştırıcı ajan kullanılarak elyaf ve matris arasındaki ara yüzey bağı güçlendirilebilir.

MAPP'nin kenevir elyaf takviyeli PP kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, Mutje ve arkadaşları [34] tarafından araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bağlayıcı ajan (MAPP) içermeyen kompozitlerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada ağırlıkça %40 kenevir lifleri içeren formülasyona ağırlıkça % 4 MAPP ilavesinin, gerilme mukavemetini ve eğilme mukavemetini sırasıyla % 49 ve % 38 arttırdığı belirtilmiştir.

Doğal liflerin termal bozunmasının meydana geldiği sıcaklık, dikkate alınması gereken ana parametrelerden biridir. Bu yüzden doğal elyaf takviyeli kompozit üretiminde termoplastiklerin ergime sıcaklıkları önem arz etmektedir. Bazı termoplastiklerin sahip olduğu daha yüksek ergime sıcaklığı, selülozda 360°C'de ve hemiselülozda 260°C'de kenevir liflerinin termal bozunmasına neden olabilir [27]. Polietilen ve polipropilen 200°C'nin altında erir; bu nedenle her iki polimer de kenevir lifleri için matris olarak kullanılabilir.

% 100 biyokompozitler üretmek için matris olarak polilaktikasit (PLA) ve polihidroksibütirat (PHB) gibi biyobozunur plastikler de kullanılabilir. PLA; iyi şeffaflık, parlak görünüm ve yüksek darbe dayanımı gibi benzersiz niteliklere sahiptir.

Polyester ve epoksi, doğal elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde en çok tercih edilen termosetlerdir. Düşük sıcaklıklarda kürleştikleri için kenevir liflerinin bozunmasına sebep olmazlar. Bu açıdan bakıldığında daha düşük bir sıcaklıkta üretim yapılabilmesi, termomekanik bozunma olmaması ve matris içerisine daha büyük miktarda doğal liflerin eklenebilmesi termosetleri termoplastiklere göre daha avantajlı kılar. Fakat termosetlerin geri dönüşümünün olmaması, termoplastiklere göre bir dezavantajdır.

Reçine transfer kalıplama (RTM), SMC, BMC, pultrüzyon, vakum infüzyon, ve elle yatırma yöntemleri, termoset kompozitler için kullanılan en yaygın üretim yöntemleridir. Sebe ve arkadaşları [35], RTM yöntemini kullanarak kenevir elyaf takviyeli polyester kompozitler üretmişlerdir. Yüksek eğilme özelliklerine sahip kaliteli parçalar elde etmişlerdir. Ancak yapısal uygulamalarda cam elyafa göre darbe dayanımının oldukça düşük olduğunu bulmuşlardır.

Prasad ve Sain [36], kenevir liflerinin gerilme özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada 4 μm 'den 800 μm 'ye kadar değişen çaplarda kenevir lifleri kullanmışlardır. Lif çapının artmasıyla gerilme dayanımının azaldığı sonucuna varmışlardır. Bu, sentetik lifler için de geçerli olan genel gözlemlerle tutarlıdır. Lif çapı azaldıkça kusurların miktarı azalır, bu da liflerin gerilme özelliklerinde artışa neden olur. 4 μm çapındaki liflerin ortalama çekme mukavemeti ve modül değerleri sırasıyla 4200 MPa ve 180 GPa iken bu değerler 66 μm çapındaki liflerde 250 MPa ve 11 GPa'a, 800 μm çapındaki liflerde ise 10 MPa ve 2 GPa'a düşmüştür.

Wambua ve ark. [37] sisal, kenaf, kenevir, jüt, hindistancevizi lifleri ve cam lifi takviyeli polipropilen kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kenevir lifleri ile güçlendirilmiş kompozitler en yüksek (52 MPa) çekme mukavemetini sergilerken hindistancevizi lifi takviyeli kompozitler daha yüksek darbe mukavemeti sergiledi. Kenevir elyaf kompozitlerin bazı spesifik özellikleri, cam elyafinkilerle karşılaştırılabilir bulundu.

3. KENEVİR ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN AVANTAJLARI ve DEZAVANTAJLARI

Avantajları:

- Yoğunluğu düşüktür, yüksek özgül rijitliğe ve mukavemete sahiptir.

- Yenilenebilir bir kaynaktır, bu nedenle üretimleri için az enerjiye ihtiyaç vardır.
- Doğal liflerin üretim maliyetleri sentetik liflere göre daha düşüktür.
- Üretim süreçleri sırasında sağlığa zarar verme riski düşüktür.
- Yakıldığında düşük toksik duman emisyonuna sahiptir.
- Sentetik elyaflara göre işleme ekipmanları için aşındırıcı değildir.
- İyi ısı ve ses yalıtımına sahiptir.

Dezavantajları:

- Sentetik elyaflar ile karşılaştırıldığında daha düşük dayanıma sahiptir ancak bu durum kimyasal ve fiziksel işlemlerle geliştirilebilir.
- Şişmeye neden olan yüksek nem absorpsiyonuna sahiptir, boyutsal kararsızlığa sebep olur.
- Büyüme durumu, hasat yöntemleri ve olgunluk gibi özellikler değişkendir.
- Daha düşük işlem sıcaklıkları nedeniyle matris seçenekleri sınırlıdır.
- Matris-elyaf ara yüzey yapışması zayıftır.

Nem, sıcaklık ve UV radyasyonu gibi hava koşulları kompozitin hizmet ömrünü olumsuz etkiler. Buna ek olarak sabit gerilme altında kenevir lifi takviyeli kompozitler, cam lifi takviyeli kompozitlere göre sürünmeye karşı daha hassastır. UV, nem, sıcaklık gibi hava koşullarının zararlı etkilerinin üstesinden gelmek için kenevir lifi takviyeli kompozitlerin özellikleri, genellikle üretim sürecinde uygun matris (termoset veya termoplastik) ve bağlayıcı ajan, UV absorbe ediciler, alev geciktiriciler vb. katkı ve/veya dolgu maddeleri kullanılarak geliştirilebilir. Böylelikle bu dezavantajlar ortadan kaldırılarak veya minimize edilerek dayanıklı ve uzun ömürlü kenevir elyaf takviyeli kompozitler üretilir.

Endüstriyel kenevir; tekstil, otomotiv, kompozitler, sunta, ısı yalıtım malzemeleri, elyaf takviyeli beton, ses yalıtımı ve/veya ses emilimi, havacılık gibi bir dizi endüstride ve ayrıca spor malzemeleri ve müzik aletlerinde takviye olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe kapı panellerinde kullanıldığı gibi fren balatası uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bununla birlikte, uygulama aralığını genişletmek ve özelliklerini geliştirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- 1) Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N., Trada, M. A., “Review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites”, *Composites Part B: Engineering*, 42, 4, 856–873 (2011)
- 2) Manaia J.P., Manaia A.T., Rodrigues L., “Industrial hemp fibers: an overview”, *Fibers*, 7, 106 (2019)
- 3) Rashid, B., Leman, Z., Jawaid, M., Ishak, M.R., Al-Oqla, F.M., “Eco-friendly composites for brake pads from agro waste: a review”. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 3, 209-228 (2017)
- 4) Shalwan, A., Yousif, B.F., “In state of art: mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres”, *Materials&Design*, 48, 14–24 (2013)
- 5) Satyanarayana, K.G., Arizaga, G.G.C., Wypych F. “Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-an overview”, *Progress in Polymer Science*, 34, 9, 982–1021 (2009)
- 6) Xia, C., Wang, K., Dong, Y., Zhang, S., Shi, S.Q., Cai, L., Ren, H., Zhang, H., Li, J., “Dual-functional natural-fiber reinforced composites by incorporating magnetite”, *Composites Part B*, 93, 221–228 (2016)
- 7) Gurunathan, T., Mohanty, S., Nayak, S.K., “A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77, 1–25 (2015)
- 8) Brosius, D., “Natural fiber composites slowly take root”, *Composites Technology*, 12,1, 32–37 (2006)
- 9) Mochane, M.J., Mokhena, T.C., Mokhothu, T.H., Mtibe, A., Sadiku, E.R., Ray, S.S., Ibrahim, I.D., Daramola, O.O., “Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: a review”, *Express Polymer Letters*, 13, 2, 159–198 (2019)
- 10) Ramasamy M., Daniel A.A., Nithya M., Kumar S.S., Pugazhenti R., “Characterization of natural-synthetic fiber reinforced epoxy based composite - hybridization of kenaf fiber and kevlar fiber”, *Materials Today: Proceedings*, 37, 3, 1699–1705 (2021)
- 11) Sivakumar D., Ng L.F., Zalani N.F.M., Selamat M.Z., Ab Ghani A.F., Fadzullah S.H.S.M., “Influence of kenaf fabric on the tensile performance of environmentally sustainable fibre metal laminates”, *Alexandria Engineering Journal*, 57, 4003–4008 (2018)
- 12) Ashik K.P., Sharma R.S., “A review on mechanical properties of natural fiber reinforced hybrid polymer composites”, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 3, 420–426 (2015)
- 13) Chandramohan, D., Marimuthu, K., “A review on natural fibers”, *IJRRAS*, 8, 2 194-206 (2011)

- 14) Bledzik, A., Gassan, J., “Composites reinforced with cellulose based fibers”, *Progress in Polymer Science*, 24, 2, 221–274 (1999)
- 15) Dhakal H.N., Hang, Z.Z., “The use of hemp fibres as reinforcements in composites”, *Biofiber Reinforcements in Composites Materials*, 86–103 (2015)
- 16) Al-Oqla F.M., Sapuan S.M., “Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry” *Journal of Cleaner Production*, 66, 347–354 (2014)
- 17) Pickering, K.L., Efendy, M.G.A., Le T.M., “A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, , 83, 98–112 (2016)
- 18) Maino, A., Janszen, G., Di Landro L., “Glass/epoxy and hemp/bio based epoxy composites: manufacturing and structural performances. *Polymer Composites*, 40, 51, E723–E731 (2019)
- 19) Pickering, K.L., Beckermann, G.W., Alam, S.N., Foreman, N.J., “Optimising industrial hemp fibre for composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 2, 461–468 (2007)
- 20) Pochwała S., Makiola D., Anweiler S., Böhm M., “The heat conductivity properties of hemp–lime composite material used in single-family buildings”, *Materials*, 13, 4, 2-14 (2020)
- 21) Patnaik S.R., Pradhan M.K., “A critical synthesis over natural fibers, include bamboo and hemp flavoured with glass fiber reinforced plastic”, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8, 6, 3582-3586 (2020)
- 22) Shahzad A., “Hemp fiber and its composites - a review”, *Journal of Composites Materials*, 46, 8, 973-986 (2012)
- 23) Gholampour A, Ozbakkaloglu T. A, “Review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications”, *Journal of Materials Science*, 55, 829-892 (2020)
- 24) Panthapulakkal, S., Sain, M., “Studies on the water absorption properties of short hemp-glass fiber hybrid polypropylene composites”, *Journal of Composites Materials*, 41, 15, 1871–1883 (2007)
- 25) Azwa, Z.N., Yousif, B.F., Manalo, A.C., Karunasena, W. A, “Review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres”, *Materials&Design*, 47, 424–442 (2013)
- 26) Kabir M.M., Wang H., Lau K.T., Cardona F., Aravinthan T., “Mechanical properties of chemically-treated hemp fibre reinforced sandwich composites”, *Composites Part B: Engineering*, 43, 2, 159–169 (2012)
- 27) Shahzad A., “A study in physical and mechanical properties of hemp fibres”, *Advances in Materials Science and Engineering*, 8, 1-9 (2013)

- 28) Ribeiro M.P., Neuba L.M., Silveira P.H.P.M., Luz F.S., Figueiredo A.B.H.S., Monteiro S.N., Moreira M.O., “Mechanical, thermal and ballistic performance of epoxy composites reinforced with Cannabis sativa hemp fabric”, *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 221-233 (2021)
- 29) <https://www.outsideonline.com/adventure-travel/advice/hemp-may-be-future-flying>, Date of Access: September 2021
- 30) <https://www.cnet.com/tech/computing/lotus-eco-elise-solar-powered-sports-car-really-is-dope>, Date of Access: September 2021
- 31) <https://www.nocoheмпexpo.com/driving-hemp-future-bmw-goes-biodegradable>, Date of Access: September 2021
- 32) <https://unytehemp.com/hemp-products>, Date of Access: September 2021
- 33) Sair S., Oushabi A., Kammouni A., Tanane O., Abboud Y., El Bouari A., “Mechanical and thermal conductivity properties of hemp fiber reinforced polyurethane composites”, *Case Studies in Construction Materials*, 8, 203–212 (2018)
- 34) Mutje P., Vallejos M.E., Girones J., Vilaseca F., Lopez A., Lopez J.P., Mendez J.A., “Effect of maleated polypropylene as coupling agent for polypropylene composites reinforced with hemp strands”, *Journal of Applied Polymer Science*, 102, 833–840 (2006)
- 35) Sebe, G., Cetin N.S., Hill, C.A.S., Hughes M., “RTM Hemp fibre-reinforced polyester composites”. *Applied Composite Materials*, 7, 341–349 (2000)
- 36) Prasad B. M., Sain M.M., “Mechanical properties of thermally treated hemp fibers in inert atmosphere for potential composite reinforcement,” *Materials Research Innovations*, 7, 4, 231–238 (2003)
- 37) Wambua, P., Ivens, J., Verpoest, I., “Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?”, *Composites Science and Technology* , 63, 9, 1259–1264 (2003)

Bölüm 22

COVID-19 HASTALIK TEŞHİSİ İÇİN DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMLARI

Handan SANCAR¹

Hasan ŞAHİN²

¹ Bursa Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Öğrencisi, ORCID: 0000-0002-7835-5309 Mail: gnyhandan@gmail.com

² Bursa Teknik Üniversitesi, Dr. Öğr. Üyesi, ORCID: 0000-0002-8915-000X, Mail: h.sahin@btu.edu.tr

GİRİŞ

COVID-19 şiddetli akut solunum yolu sendromu SARS-CoV-2 virüsünün neden olduğu bir hastalıktır. 2019 yılının sonlarında Çin'in Wuhan kentinde başlayan yeni tip koronavirüs salgını (COVID-19), tüm dünyaya yayılan ve hayatın her alanını etkileyen küresel bir salgın haline gelmiştir [17]. İlerleyen süreçte Avrupa, Kuzey Amerika Asya-Pasifik'te yer alan çeşitli virüs vakalarının rapor edilmeye başlanmasıyla 11 Mart 2020'de Dünya Sağlık Örgütü tarafından küresel salgın ilan edilmiş ve Avrupa'nın artık koronavirüs krizinin merkez üssü haline geldiği bildirilmiştir.

O zamandan bu yana tüm dünyaya hızla yayılan coronavirüs halen devam eden bir pandemiye neden olmuştur. 27 Haziran 2021 tarihi itibarıyla dünyada 181.757.224 onaylanmış vaka, 166.266.289 iyileşen varken virüs nedeniyle ölen hasta sayısı 3.936.658'dir. Türkiye'de ise toplam vaka sayısı 5.409.027 iken ölen hasta sayısı 49.576'dır.

Hastalığın yayılmasının kontrol altına alınabilmesi için tüm dünyada çeşitli önlemler alınmıştır. Ülkeler yüksek risk barındıran şehirlerini karantinaya almış, hatta bazı ülkeler tamamen karantinaya alınmıştır. Ülkeler arası uçuşlar askıya alınmış, okullarda eğitim öğretime ara verilmiş, tiyatro, sinema, lokanta, kafe ve kahvehaneler, AVM berber ve kuaför salonları kapatılmıştır.

Hastalık damlacık yoluyla bulaşmakta hasta kişilerde yüksek ateş, öksürük yorgunluk nefes almada zorluk koku ve tat duyusunda kayıp gibi semptomlar görülmektedir. Bazı hastalarda bu semptomlar şiddetli iken bazı hastalarda herhangi bir semptom görülmemektedir.

Hastalık teşhisinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

PCR adı verilen bir laboratuvar tekniği kullanılarak kişinin burun ve boğazından alınan sürüntü örneklerinde virüsün genetik materyalinin (RNA parçalarının) bulunup bulunmadığını tespit eder. Bu nedenle virüsün doğrudan varlığını saptamaya yönelik bir testtir. Doğruluk oranı %71 civarındadır.

Antikor testinde vücudun bağışıklık sisteminin virüse karşı antikor üretip üretmediği tespit etmek için kandaki antikorların varlığına bakılır. Bu test virüsün varlığını tespit etmez. Kişinin koronavirüs enfeksiyonu geçirip geçirmediğini ve bağışıklığının bulunup bulunmadığını tespit etmek için kullanılır.

Covid-19 hastalık teşhisinde kullanılan en hızlı ve en etkili yöntem torsaks (göğüs) bilgisayarlı tomografisidir. BT'de tipik bulgular iki taraflı buzlu cam görünümüdür. Akciğerlerde bir yoğunluk artışı türü olan konsolidasyon, lineer opasiteler ve ters halo işareti vakalardaki diğer rad-

yolojik bulgularıdır. Hastalık başlangıcında lezyonlar sadece bir akciğeri etkilerken, semptomların ortaya çıkmasından 6-12 gün sonrasını kapsayan ilerleyen evrelerde hastaların %88'inde iki akciğerin de etkilendiği gözlemlenmiştir. Doğruluk oranı %98 civarındadır.

BT tarama görüntüsünün faydalarına rağmen, Covid-19 ve diğer akciğer hastalıkları arasında benzer özellikler bulunmaktadır. Bu bakımdan taramanın yürütülmesi oldukça zordur. Son zamanlarda, radyolojik görüntüler üzerinden, makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri kullanılarak bazı özelliklerin çıkarılması ve tespit edilmesi kullanışlı hale gelmiştir [1]. Bu çalışmada, Covid-19 pozitif hastalarını, BT tarama görüntülerinden tespit etmek için kullanılan derin öğrenme teknikleri incelenmiştir. Kullanılan veri setleri ve yöntemler incelenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

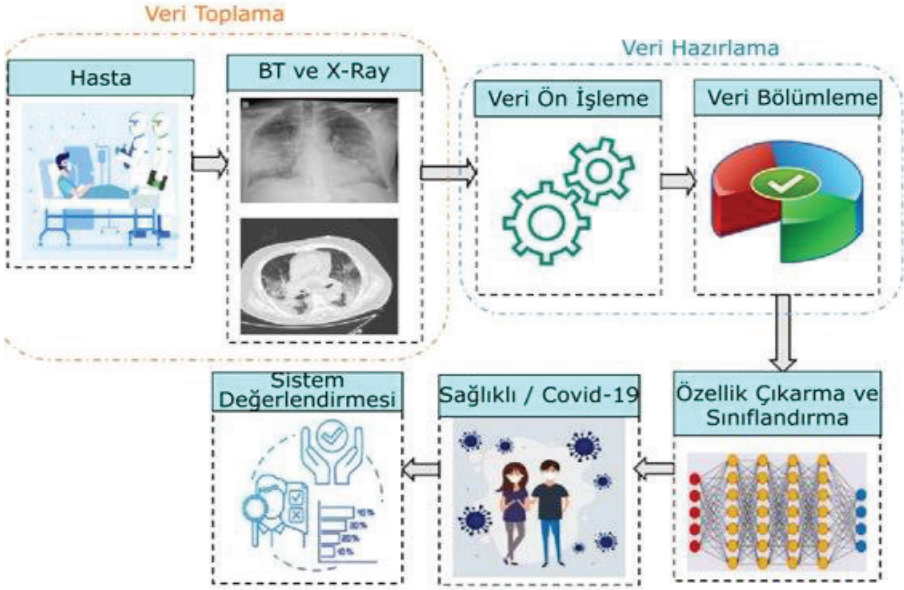
Bu kitap bölümü, Bilgisayarlı Tomografi (BT) tıbbi görüntüleme tekniğini kullanan derin öğrenme tekniklerine dayalı yeni geliştirilen sistemleri gözden geçirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada derin öğrenme teknikleri anlatılmakta, derin öğrenme teknikleri kullanılarak COVID-19 teşhisi için geliştirilen sistemler tartışılıp bu ağları eğitmek için kullanılan iyi bilinen veri kümeleri hakkında fikir verilmektedir. Ayrıca veri bölümlenme teknikleri ve çeşitli performans ölçütleri de vurgulanmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Derin öğrenme teknikleri basit tasvirlerden öğrenerek karmaşık sorunları açıklayabilir. Derin öğrenme yöntemlerini popüler hale getiren temel özellikler, öğrenme yeteneği ve çoklu katmanların ardışık olarak kullanıldığı, verileri derinlemesine öğrenme özelliğidir. Derin öğrenme yöntemleri, biyotıp, akıllı sağlık hizmeti, ilaç keşfi, tıbbi görüntü analizi vb. gibi tıbbi sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [14].

Son zamanlarda, hastalarda COVID-19'un otomatik teşhisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak derin öğrenme tabanlı sistemler, veri toplama, veri hazırlama, özellik çıkarma ve sınıflandırma ile performans değerlendirme gibi bazı adımdan oluşur. Derin öğrenmeye dayalı bir COVID-19 tanı sisteminin genel hatları Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Veri toplama aşamasında hastane ortamından hastalar katılımcı olarak kabul edilmektedir. Veriler farklı şekillerde olabilir ancak COVID-19 teşhisi için BT ve X-ray örnekleri gibi görüntüleme teknikleri alınır. Veriler alındıktan sonra veri işleme adımı uygun bir formata dönüştürülmektedir. Bu adımda, veri ön işleme, gürültü giderme, yeniden boyutlandırma, büyütme vb. gibi bazı işlemleri içerir. Veri bölümlenme adımı, verileri deney için eğitim, doğrulama ve test kümesine böler. Genel olarak, veri bölümlenme için çapraz doğrulama tekniği kullanılır. Eğitim verileri,

doğrulama verileriyle değerlendirilen belirli bir modeli geliştirmek için kullanılır ve geliştirilen modelin performansı test verileriyle değerlendirilir. Derin öğrenme tabanlı COVID-19 teşhisinin en büyük adımı, özellik çıkarma ve sınıflandırmadır. Bu aşamada, derin öğrenme tekniği birkaç işlemi art arda gerçekleştiren özelliği otomatik olarak çıkarır ve son olarak sınıf etiketlerine (sağlıklı veya COVID-19) göre sınıflandırma yapılır. Son olarak, geliştirilen sistem doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik gibi bazı değerlendirme ölçütleriyle değerlendirilir.



Şekil 1: Derin öğrenme tabanlı Covid-19 teşhis sisteminin genel şeması

Derin öğrenme insan beyninin karmaşık problemler için gözlemleme, analiz etme, öğrenme ve karar verme gibi yeteneklerini taklit eden, denetimli veya denetimsiz olarak özellik çıkarma, dönüştürme ve sınıflandırma gibi işlemleri büyük miktarlardaki verilerden yararlanarak yapabilen bir makine öğrenmesi tekniğidir.

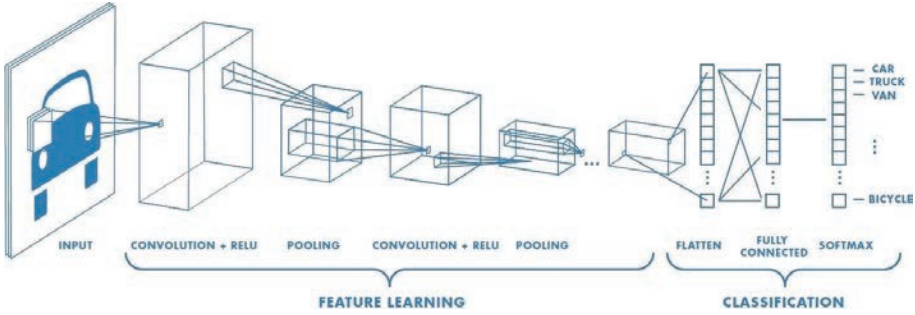
Derin öğrenme, yapay sinir ağları ve insan beyninin işlevlerini taklit eden hesaplama sistemleri kavramına dayanır.

Derin öğrenme algoritmaları oluşturulurken, kullanılacak mimari büyük önem taşımaktadır. Bu mimariler verinin türüne, boyutuna, hacmine ve yapısına, kullanılacak olan parametrelere göre farklılık gösterebilmektedir.

COVID-19 hastalık teşhisinde en çok kullanılan mimari Evrişimsel Sinir Ağları (CNN)'dir. Evrişimsel Sinir Ağları derin öğrenmenin bir alt dalıdır ve genellikle görsel bilginin analiz edilmesinde kullanılır.

a. Evrişimsel Sinir Ağlarına Genel Bir Bakış

Günümüzde evrişimsel sinir ağları (CNN'ler) ve derin öğrenme tabanlı çözümler birçok problemde en iyi sonuçları sağlar. Görüntü tanıma, konuşma tanıma ve doğal dil işleme gibi farklı alanlarda uygulanabilirler. Derin öğrenme, makine öğreniminin bir dalıdır ve amacı, doğrusal olmayan işlemlerin birden çok katmanını kullanarak verilerin daha yüksek seviyeli temsillerini oluşturmaktır. Bu daha yüksek seviyeli temsiller, sınıflandırma ve tanıma için temel veya ham özelliklerden çok daha kullanışlıdır. Evrişimsel sinir ağının genel mimarisini Şekil 2'de görebiliriz.



Şekil 2: Evrişimsel sinir ağlarının genel mimarisini

b. Evrişimsel Sinir Ağlarının Temel Bileşenleri

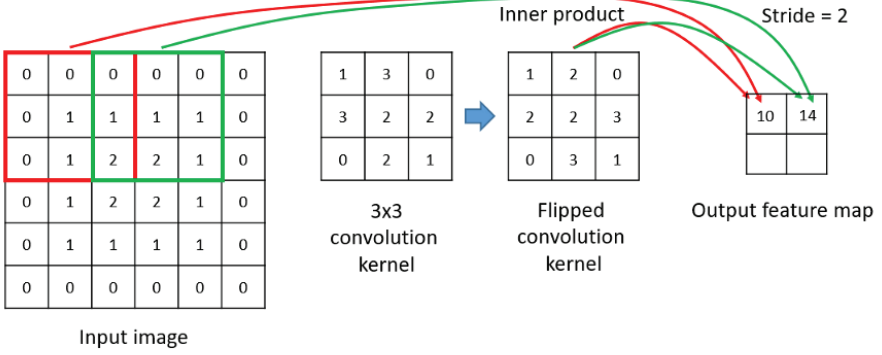
Evrişimsel sinir ağlarının temel bileşenleri; evrişim(konvolüsyon), havuzlama(pooling), ReLu, seyreltme(drop-out), tam bağlantılı katman ve sınıflandırma katmanlarıdır.

Giriş Katmanı: Evrişimsel sinir ağının ilk katmanıdır ve ham veri bilgisini içermektedir. Ağın yapısına bağlı olarak giriş görüntü boyutu önem taşımaktadır. Görüntü boyutunun yüksek olması gerekli bellek ihtiyacını ve eğitim süresini yükseltirken boyutun az olması da ağın derinliğini kısalttığından sistemin başarısını düşürebilir. Bu nedenle derin öğrenmede boyutun optimum seçimi sonucu etkileyen önemli faktörlerdendir [15].

Evrişim (konvolüsyon) katmanı: Derin sinir ağının temelini oluşturan Evrişim katmanı, küçük boyutlu filtrelerin(örneğin 2x2,3x3 ve 5x5 gibi) tüm görüntü üzerinde gezdirilmesine dayanmaktadır.

Filtreler, bir önceki katmandan gelen görüntü piksellerine konvolüsyon işlemi uygulayarak, her bir filtreye özgü özelliklerin keşfedildiği bölgeler içeren aktivasyon haritası (özellik haritası) oluşturmaktadır.

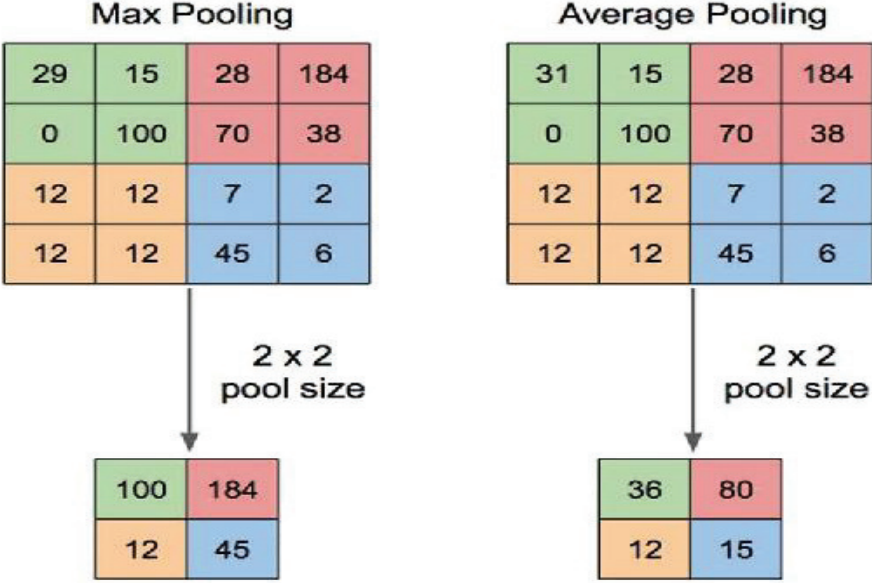
Eğitim sırasında ağırlıkların güncellenmesiyle görüntünü önem taşıyan bölgeleri belirlenmektedir [15]. Örnek bir filtrenin görüntü üzerine uygulanması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3 : 6x6 boyutta bir giriş görüntüsüne 3x3'lük filtrenin uygulandığı bir konvolüsyon işlemi

ReLU (düzleştirilmiş doğrusal birim): Derin sinir ağlarına dayalı modellerde en yaygın kullanılan aktivasyon fonksiyonu katmanıdır. Bu katmanın etkisiyle giriş verisindeki negatif değerler sıfıra çekilmektedir. Bunun sonucunda ağın hızlı öğrenmesi sağlanmaktadır [15].

Havuzlama katmanı: Temel amacı bir sonraki konvolüsyon katmanı için giriş boyutunun azaltılmasıdır. Havuzlama işlemi ile veri üzerinde kayıplar oluşmaktadır. Ancak ağda dolaşacak olan veri miktarındaki azalma ağın daha hızlı olmasını sağlamaktadır. İlk basamakta gerçekleştirilen konvolüsyon işlemindeki gibi havuzlama katmanında da çeşitli filtreler belirlenmektedir. Bu filtrenin görüntü üzerinde gezdirilmesiyle görüntüdeki piksellerin maksimum(maximum pooling) veya ortalama değerleri(average pooling) alınarak havuzlama işlemi gerçekleştirilmiş olur [15].



Şekil 4: 2x2'lik filtre kullanılarak gerçekleştirilen havuzlama işlemi

Düzleştirme (flattening): Bu katmanın görevi son ve en önemli katman olan Tam Bağlantılı katmanın girişindeki verileri hazırlamaktır.

Tam Bağlantılı Katman(Fully Connected Layer): CNN mimarisine konvolüsyon ve ReLu katmanından sonra genellikle tam bağlantılı katman yerleştirilmektedir. Bu katman kendinden önceki katmanın tüm nöronlarıyla bağlantılıdır. Tam bağlantılı katmanda nesneyi belirleyecek olan özelliklerin hangi sınıfla ilişkili olduğu belirlenir. Bir örüntü ele alınacak olursa; örüntüdeki bir insanın tespit edilmesini sağlayan özellikler aktivasyon haritalarında yüksek değere sahip nöronda yer alacaktır. Bir tam bağlı katman bir sınıfla ilişki derecesi yüksek olan yüksek seviyeli özelliklere bakar. Bu özellikleri belirten ağırlıkların olduğu nöronlara bakılarak hangi sınıfa ait olduğu ortaya çıkmış olur [15].

Seyreltme (DropOut) Katmanı: Evrimsel sinir ağlarındaki eğitim sırasında katman sayısı çok olduğunda ve çok uzun süre içerisinde az veri ile eğitim gerçekleştirildiğinde aşırı öğrenme(overfitting) riskini engellemek için bazı nöronlar işlem dışında bırakılmaktadır. Derin öğrenmede ezberlemenin önlenmesine yönelik bu işleme seyreltme(drop out) yaklaşımı denilmektedir [15].

Sınıflandırma Katmanı (Classification Layer): Tam bağlı katmandan sonra gelen sınıflandırma katmanı sınıflandırılması yapılacak öge sayısı kadar sonuç üretir. Bu sonuçların her biri bir sınıfı temsil eder. Son katman olarak bilinen sınıflandırıcı katman için farklı türde sınıflandırıcılar

kullanılsa da genellikle softmax sınıflandırıcı kullanılır [15].

c. Evrişimsel Sinir Ağının Eğitilmesi

Adım 1. İlk önce problemin uygulanacağı ağ mimarisi ve hiperparametreler belirlenir. Hiperparametreler ağ yapısını ve ağın nasıl eğitildiğini belirleyen parametreleri belirleyen değişkenlerdir. Oluşturulacak modele uygun evrişim, havuzlama, tam bağlantılı ve sınıflandırma katmanlarının sayısı ve sıralaması tanımlanır [15].

Adım 2. Giriş nöron sayısı, filtre sayısı ve boyutları, kaydırma adım sayısı belirlenir. Her filtreye 0-1 aralığında değer atanır [15].

Adım 3. Eğitim setinden bir görüntü ağın girişine sunulur. İleri yayılma algoritmasına göre ilgili katmanda her bir filtrenin ağırlıkları ile görüntüdeki piksel değerleri çarpılıp bunların toplamı bir sonraki katmana aktarılır [15].

Adım 4. Ağın üretmiş olduğu sonuçlarla beklenen sonuçların farkına göre toplam hata değeri hesaplanır [15].

Adım 5. Geriye yayılım algoritması yardımıyla elde edilen hata değerinin ağıdaki bütün ağırlıklara dağıtılması sağlanır. Ağırlıkların güncellenmesiyle ağın çıkışındaki toplam hata değeri düşürülmeye ve böylelikle sınıflandırma başarısının artırılmasına çalışılır [15].

Adım 6. eğitim setindeki bütün görüntüler için Adım 3, 4 ve 5 tekrar edilir.

Adım 7. Hata önceden belirlenen değerin altına indiğinde eğitim tamamlanır.

VERİ SETLERİ VE KULLANILAN TEKNİKLER

Bu makalede Covid-19 hastalık teşhisi için 10 farklı çalışma incelenmiştir. İncelenen çalışmalarda kullanılan veri setleri ile uygulanan teknikler aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

Maghdid ve arkadaşları AlexNet ile transfer öğrenme tekniğini kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada GitHub'dan ve BSTI (British Society of Thoracic Imaging)'dan elde ettikleri veri setlerini kullanmışlardır. Bu veri setlerinde 203 adet Covid-19'lu, 153 adet de normal (sağlıklı) akciğer görüntüsü bulunmaktadır. Çalışmada eğitim ve test verileri %50 oranında eşit olarak bölünmüştür [5].

Shah ve arkadaşları VGG-16 ile transfer öğrenme tekniğini kullanmışlar, ayrıca kendi geliştirdikleri CTnet-10 ağını kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada open-source bir dataset olan COVID-CT veri setini kullanmışlardır. Bu veri setlerinde 349

adet Covid-19'lu, 463 adet de normal(sağlıklı) akciğer görüntüsü bulunmaktadır. Veri seti %80'i eğitim, %10u doğrulama ve %10'u test için olmak üzere üç parçaya bölünmüştür[6].

Özbay ve arkadaşları evrişimsel sinir ağlarını kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada Kaggle'dan elde ettikleri veri setini kullanmışlardır. Bu veri setinde 1252 adet Covid-19'lu, 463 adet de normal(sağlıklı) akciğer görüntüsü bulunmaktadır. Veri seti %75'i eğitim ve %25'i test için olmak üzere iki parçaya bölünmüştür [1].

Bütüner ve arkadaşları evrişimsel sinir ağları ile derin sinir ağlarını kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada Kaggle'dan elde ettikleri veri setini kullanmışlardır. Bu veri setinde 766 adet Covid-19'lu, 6305 adet normal(sağlıklı), 6020 adet Bakteriyel Pnömani ve 1345 adet de Viral Pnömani'ye ait akciğer görüntüsü bulunmaktadır. Veri seti %85'i eğitim ve %15'i test için olmak üzere iki parçaya bölünmüştür [7].

Ardakani ve arkadaşları ResNet-101, VGG-19 ve Xception mimarilerini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada yerel bir üniversite hastanesinden elde ettikleri veri setini kullanmışlardır. Bu veri setlerinde 510 adet Covid-19'lu, 510 adet de normal(sağlıklı) akciğer görüntüsü bulunmaktadır. Veri seti %80'i eğitim ve %20'si test için olmak üzere iki parçaya bölünmüştür [8].

Jin ve arkadaşları ResNet152 mimarisini kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada üç farklı yerel hastaneden elde ettikleri veri setlerini kullanmışlardır. Bu veri setlerinde 496 adet Covid-19'lu, 1385 adet de normal(sağlıklı) akciğer görüntüsü bulunmaktadır. Çalışmada eğitim ve test verilerini rastgele bölmüşlerdir [9].

Çiftçi ve arkadaşları AlexNet ve Inception-V4 mimarilerini kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada Kaggle'dan elde ettikleri veri setini kullanmışlardır. Bu veri setlerinde toplam 5800 adet akciğer görüntüsü bulunmaktadır. Veri seti %80'i eğitim ve %20'si test için olmak üzere iki parçaya bölünmüştür [10].

Yousefzadeh ve arkadaşları DenseNet, ResNet ve Xception mimarilerini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada yerel bir üniversite hastanesinden elde ettikleri veri setini kullanmışlardır. Bu veri setlerinde 706 adet Covid-19'lu, 1418 adet de normal(sağlıklı) akciğer görüntüsü bulunmaktadır. Veri seti %80'i eğitim ve %20'si test için olmak üzere iki parçaya bölünmüştür [11].

Wu ve arkadaşları ResNet mimarisini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada iki farklı yerel hastaneden elde ettikleri veri setlerini kullanmışlardır. Bu veri setlerinde 368 adet Covid-19'lu, 127 adet de normal (sağlıklı) akciğer görüntüsü bulunmaktadır.

Veri seti %80'i eğitim, %10u doğrulama ve %10'u test için olmak üzere üç parçaya bölünmüştür[12].

Li ve arkadaşları ResNet50 mimarisini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada yerel hastanelerden elde ettikleri veri setlerini kullanmışlardır. Bu veri setlerinde 1296 adet Covid-19'lu, 1325 adet de normal(sağlıklı) akciğer görüntüsü bulunmaktadır. Veri seti %90'ı eğitim ve %10'u test için olmak üzere iki parçaya bölünmüştür [13].

Çubukçu ve Aktürk [16], öğrencileri Covid-19 pandemisine karşı uzaktan eğitime yönlendirmek ve ücretsiz çevrimiçi platformlar kullanmaya zorlamak, hem öğrencileri hem de öğretmenleri özel hayatlarında etkileyebilecek birçok büyük veri tehditleri içerdiğini vurgulamışlar ve somut çözümler önermişlerdir.

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Aşağıdaki tabloda derin öğrenme tabanlı Covid-19 hastalık teşhis sistemleri kısaca özetlenmiştir. Bu sistemlerde AlexNet, VGG-16, ResNet, Xception, Inception, DenseNet gibi evrimsel sinir ağı mimarileri kullanılmaktadır. Veri setleri ise GitHub, Kaggle gibi platformlara ek olarak çeşitli yerel hastaneler ve üniversite hastanelerinden de elde edilmiştir. Bu veriler eğitim ve test verileri olarak bölünüp kullanılan ağlar eğitilmiş ve elde edilen doğruluklar da aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Tablo 1: Derin öğrenme tabanlı Covid-19 hastalık teşhis sistemlerinin özeti

Yazar	Data Set Kaynağı	Görüntü Sayısı	Sınıf Sayısı	Bölme	Teknik	Performans
Maghdid ve arkadaşları [5]	GitHub, BSTI-British Society of Thoracic Imaging	COVID19 :203 Normal:153	2(COVID-19 pozitif, COVID-19 negatif)	Eğitim: %50 Test: %50	AlexNet (Transfer Öğrenme)	Doğruluk: %94 Duyarlılık:%90 Özgüllük: %100
Shah ve arkadaşları [6]	COVID-CT (open-sourced dataset)	COVID19 :349 Normal:463	2(COVID-19 pozitif, COVID-19 negatif)	Eğitim: %80 Doğrulama: %10 Test: %10	CTnet-10 (Self-developed network)	Doğruluk: 82.1
					VGG-19 (transfer öğrenme)	Doğruluk: %94.5
Özbay ve arkadaşları [1]	Kaggle	COVID19 :1252 Normal: 1230	2(COVID-19 pozitif, COVID-19 negatif)	Eğitim: %75 Test: %25	Evrimsel Sinir Ağı (CNN)	Doğruluk:%98 Kesinlik: %94 Duyarlılık:%97.7Özgüllük:%97.4
Büttiner ve arkadaşları [7]	Kaggle	COVID19 :766 Normal: 6305 Bakteriyel Pnömani: 6020 Viral Pnömani: 1345	4(COVID-19, Bakteriyel Pnömani, Viral Pnömani, Normal)	Eğitim: %85 Test: %15	Evrimsel Sinir Ağı (CNN)	Doğruluk:%98.4
					Derin Sinir Ağı (DNN)	Doğruluk:%90.4

Ardakani ve arkadaşları [8]	Yerel Üniversite Hastanesi	COVID19 :510 Normal: 510	2(COVID-19 pozitif, COVID-19 negatif)	Eğitim: %80 Test: %20	ResNet-101	Doğruluk:%99.4 Duyarlılık:%100 Özgüllük:%99.2
					VGG-19	Doğruluk:%87.1 Duyarlılık:%94.8 Özgüllük:%79.4
					Xception	Doğruluk:%99.3 Duyarlılık:%98.8 Özgüllük:%100
Jin ve arkadaşları [9]	3 farklı yerel hastane	COVID19 :496 Normal: 1385	2(COVID-19 pozitif, COVID-19 negatif)	Rastgele	ResNet152	Doğruluk:%95.0 Duyarlılık:%94.1 Özgüllük:%94.5 Hassasiyet:%91
Cifci [10]	Kaggle	5800	2(COVID-19 pozitif, COVID-19 negatif)	Eğitim: %80 Test: %20	AlexNet	Doğruluk:%96.6 Duyarlılık:%86.9 Özgüllük:%87.5
					Inception-V4	Doğruluk:%86.1 Duyarlılık:%82.6 Özgüllük:%79.0
Yousefzadeh ve arkadaşları [11]	Yerel Hastane	COVID19 :706 Normal: 1418	2(COVID-19 pozitif, COVID-19 negatif)	Eğitim: %80 Test: %20	DenseNet, ResNet, Xception	Doğruluk:%96.4 Duyarlılık:%92.4 Özgüllük:%98.3
Wu ve arkadaşları [12]	2 farklı yerel hastane	COVID19 :368 Normal: 127	2(COVID-19 pozitif, COVID-19 negatif)	Eğitim: %80 Doğrulama: %10 Test: %10	ResNet50	Doğruluk:%76 Duyarlılık:%81.1 Özgüllük:%61.5
Li ve arkadaşları [13]	Yerel Hastaneler	COVID19 :1296 Normal: 1325	3(COVID-19 pozitif, CAP, COVID-19 negatif)	Eğitim: %90 Test: %10	ResNet50	Doğruluk:%96 Duyarlılık:%90 Özgüllük:%96

Maghdid ve arkadaşlarının önerdiği AlexNet tabanlı sistemde %90 duyarlılık ve %100 özgüllük ile %94 doğruluk elde edilmiştir [5]. Maghdid ve arkadaşlarının önerdiği Shah tabanlı sistemde %94.5 doğruluk elde edilirken kendi geliştirdikleri CTnet-10 ağı ile %82.1 doğruluk elde edilmiştir [6]. Özbay ve arkadaşlarının önerdiği evrişimsel sinir ağı tabanlı sistemde %97.7 duyarlılık ve %97.4 özgüllük ile %98 doğruluk elde edilmiştir[1]. Bütüner ve arkadaşları Covid-19'a ek olarak bakteriyel pnömani ile viral pnömaniye de tepit eden bir sistem önermişlerdir. Önerilen bu sistemde evrişimsel sinir ağları ve derin sinir ağları kullanılmıştır. Evrişimsel sinir ağı ile elde edilen doğruluk %98.4 iken derin sinir ağı ile elde edilen doğruluk %90.4'tür [7]. Ardakani ve arkadaşları önerdikleri sistemde ResNet-101, VGG-19 ve Xception mimarilerini kullanmışlardır. ResNet-101 ile %100 duyarlılık ve %99.2 özgüllük ile %99.4 doğruluk elde edilmiştir. VGG-19 ile %94.8 duyarlılık ve %79.4 özgüllük ile %87.1 doğ-

ruluk elde edilmiştir. Xception ile %98.8 duyarlılık ve %100 özgüllük ile %99.3 doğruluk elde edilmiştir [8]. Jin ve arkadaşlarının önerdiği ResNet-152 tabanlı sistemde %94.1 duyarlılık, %94.5 özgüllük ve %91 hassasiyet ile %95 doğruluk elde edilmiştir[9]. Ciftci ve arkadaşları AlexNet ve Inception-V4 kullanarak bir sistem önermişlerdir. AlexNet ile %86.9 duyarlılık ve %87.5 özgüllük ile %96.6 doğruluk elde edilmiştir. Inception-V4 ile %82.6 duyarlılık ve %79.0 özgüllük ile %86.1 doğruluk elde edilmiştir[10]. Yousefzadeh ve arkadaşları önerdikleri sistemde DenseNet, ResNet ve Xception mimarilerini kullanmışlardır. Bu sistemde %92.4 duyarlılık ve %98.3 özgüllük ile %96.4 doğruluk elde edilmiştir[11]. Wu ve arkadaşlarının önerdiği ResNet-50 tabanlı sistemde %81.1 duyarlılık ve %61.5 özgüllük ile %76 doğruluk elde edilmiştir[12]. Li ve arkadaşlarının önerdiği ResNet-50 tabanlı sistemde %90 duyarlılık ve %96 özgüllük ile %96 doğruluk elde edilmiştir[13].

Covid-19 hastalık teşhisi için pek çok derin öğrenme yaklaşımı önerilmektedir. Bu yaklaşımlarda görsel veri analizindeki yüksek başarısı nedeniyle Evrişimsel Sinir Ağları (CNN) kullanıldığı görülmektedir.

BT görüntülerinden COVID-19 hastalık teşhisi için yapılan bir çalışmada veri seti %75 : %25 oranında bölünerek %75'i eğitim verisi olarak %15'i ise test verisi olarak kullanılmıştır.

COVID-19 vakalarını sınıflandırmak için 5 farklı sınıflandırma tekniği karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonucunda en yüksek doğruluk Evrişimli Sinir Ağları (ESA) kullanılarak elde edilmiştir.

Evrişimsel Sinir Ağları, Derin Sinir Ağları ve K-en Yakın Komşuluk Algoritması kullanılarak yapılan bir başka çalışmada COVID-19 hastalık teşhisinde en yüksek doğruluk yine Evrişimsel Sinir Ağları ile elde edilmiştir [7].

İncelenen çalışmalarda kullanılan derin öğrenme tabanlı sistemlerde doğruluk oranının genel olarak yüksek olduğu görülmektedir. Doğruluk oranı veri setinin kalitesi, sistemin eğitilmesinde kullanılan veri miktarı, ağın mimarisi ve ağın eğitimi sırasında kullanılan parametreler gibi pek çok değişkene bağlıdır. Aynı mimari kullanılarak yapılan çalışmalarda elde edilen doğruluk oranlarının farklı olması da bu parametre farklılıklarından kaynaklanmaktadır.

SONUÇ

COVID-19, enfeksiyon ve ölüm sayıları günden güne artarak devam eden bir salgın olmaya devam etmektedir. Tutarlı ve doğru bir derin öğrenme tabanlı otomatik COVID-19 teşhisi, bu hastalığın teşhisine önemli

ölçüde yardımcı olmaktadır. Bu makale, BT görüntüleme tekniğinden derin öğrenme tekniklerini kullanarak COVID-19 tanı amaçlı son çalışmaları incelemektedir.

Bu çalışmanın amacı, BT ve röntgen görüntülerine dayalı, iyi bilinen bazı derin öğrenme tabanlı COVID-19 tanı sistemlerini gözden geçirmek ve sunmaktır. Literatürde tartışılan yönlerin çoğu burada vurgulanmakla birlikte, gelecekteki çalışmalarda ele alınması gereken birkaç sınırlama vardır. İlk olarak, bu çalışmada yalnızca derin öğrenme tekniklerine dayanan COVID-19 tanı sistemleri açıklanmıştır, ancak matematiksel temsilleri vurgulayan derin öğrenme teknikleri hakkında arka plan bilgisinin belirli bir açıklaması yoktur.

İkinci olarak, incelenen sinir ağlarının katman sayısı, katman özelliği, öğrenme oranı gibi bazı parametrelerden burada bahsedilmemektedir ve bunun yerine okuyucu ilgili referanslara başvurmaya davet edilir. Üçüncüsü, bu makalede bilgisayarlı görme perspektifinden COVID-19 teşhisi tartışılrsa da, bu makale BT görüntülerinde herhangi bir nitel tanı sonucu sağlamamaktadır. Dördüncüsü, incelenen sistemlerin çoğu, yaklaşık olarak %90'dan fazla doğruluk sunar, ancak gözden geçirilen sistemlerin gerçek dünyada güvenilirliği sorgulanmaya açıktır.

Derin öğrenmeye dayalı COVID-19 teşhis sistemlerinin en büyük zorluğu belirli standartların olmamasıdır. Ayrıca, bu alanda katkıda bulunmak isteyen araştırmacıları motive etmek ve teşvik etmek ve mevcut zorlukların üstesinden gelmek için olası çözümler önerilmektedir. Görüntüleme yöntemlerine sahip derin öğrenme tekniklerinin, enfekte hastalar hakkında yalnızca kısmi ayrıntılar sunduğunu belirtmekte fayda var. Bu çalışmada, klinik teşhiste doktorların veya klinisyenlerin rolünün derin öğrenme teknikleriyle değiştirilebileceği ima edilmemektedir. Yakın gelecekte, derin öğrenme uzmanlarının, özellikle hastalığın erken evrelerinde COVID-19 enfeksiyonlarını tanımlamak veya enfeksiyonun ciddiyet düzeyini ölçmek için ve uygun destek sistemleri sağlamak için radyologlar ve tıp uzmanlarıyla proaktif bir şekilde iş birliği yapması umulmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Özbay, E., & A Özbay, F. (2021). Covid-19 Detection from CT images with Deep Learning and Classification Approaches. *Dicle University Journal of Engineering*, 12(2), 211-219.
- [2] <https://azure.microsoft.com/tr-tr/overview/what-is-machine-learning-platform/>
- [3] <https://www.ibm.com/tr-tr/cloud/learn/machine-learning>
- [4] <https://docs.microsoft.com/tr-tr/azure/machine-learning/concept-deep-learning-vs-machine-learning>
- [5] Maghdid, H. S., Asaad, A. T., Ghafoor, K. Z., Sadiq, A. S., Mirjalili, S., & Khan, M. K. (2021, April). Diagnosing COVID-19 pneumonia from X-ray and CT images using deep learning and transfer learning algorithms. In *Multimodal Image Exploitation and Learning 2021* (Vol. 11734, p. 117340E). International Society for Optics and Photonics.
- [6] Shah, V., Keniya, R., Shridharani, A., Punjabi, M., Shah, J., & Mehendale, N. (2021). Diagnosis of COVID-19 using CT scan images and deep learning techniques. *Emergency radiology*, 28(3), 497-505.
- [7] Bütüner, R., & Calp, M. H. (2020). COVID-19 Detection from Lung Tomography Images Using Deep Learning and Machine Learning Methods (No. 4097). *EasyChair*.
- [8] Ardakani, A. A., Kanafi, A. R., Acharya, U. R., Khadem, N., & Mohammadi, A. (2020). Application of deep learning technique to manage COVID-19 in routine clinical practice using CT images: Results of 10 convolutional neural networks. *Computers in biology and medicine*, 121, 103795.
- [9] Jin, C., Chen, W., Cao, Y., Xu, Z., Tan, Z., Zhang, X., ... & Feng, J. (2020). Development and evaluation of an artificial intelligence system for COVID-19 diagnosis. *Nature communications*, 11(1), 1-14.
- [10] Cifci, M. A. (2020). Deep learning model for diagnosis of corona virus disease from CT images. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 11(4), 273-278.
- [11] Yousefzadeh, M., Esfahanian, P., Movahed, S. M. S., Gorgin, S., Rahmati, D., Abedini, A., ... & Lashgari, R. (2021). ai-corona: Radiologist-assistant deep learning framework for COVID-19 diagnosis in chest CT scans. *PLoS one*, 16(5), e0250952.
- [12] Wu, X., Hui, H., Niu, M., Li, L., Wang, L., He, B., ... & Zha, Y. (2020). Deep learning-based multi-view fusion model for screening 2019 novel coronavirus pneumonia: A multicentre study. *European Journal of Radiology*, 128, 109041.

- [13] Li, L., Qin, L., Xu, Z., Yin, Y., Wang, X., Kong, B., ... & Xia, J. (2020). Artificial intelligence distinguishes COVID-19 from community acquired pneumonia on chest CT. *Radiology*.
- [14] Milon Islam, M., Karray, F., Alhajj, R., & Zeng, J. (2020). A Review on Deep Learning Techniques for the Diagnosis of Novel Coronavirus (COVID-19). *arXiv e-prints*, arXiv-2008.
- [15] NABİYEYEV, V. 2021, "Yapay Zeka" 6. Baskı, Seçkin Yayınevi
- [16] Çubukçu, C., & Aktürk, C. (2020). The rise of distance education during covid-19 pandemic and the related data threats: a study about zoom. *Igd Univ Jour Soc Sci*, (Ek2), 127-143.
- [17] Aktürk, C., Şenol, A., & Talan, T. (2021). Cloud Computing Technology During Covid-19 Pandemic, *International Asian Congress On Contemporary Sciences-V*, Nakhchivan, 2021.