

# MÜHENDİSLİKTE

GÜNCEL ARAŞTIRMALAR

MART 2023

Editörler

Doç. Dr. Selahattin Bardak

Doç. Dr. Ümit Ayata

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 • Doç. Dr. Selahattin Bardak**  
Doç. Dr. Ümit Ayata  
**Birinci Basım / First Edition • © Mart 2023**  
**ISBN • 978-625-430-706-5**

**© 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](http://www.gecekitapligi.com)

**e-mail:** [gecekitapligi@gmail.com](mailto:gecekitapligi@gmail.com)



**Baskı & Cilt / Printing & Volume**

Sertifika / Certificate No: 47083

# Mühendislikte Güncel Araştırmalar

Mart 2023

Editörler

Doç. Dr. Selahattin BARDAK  
Doç. Dr. Ümit AYATA





# İÇİNDEKİLER

## Bölüm 1

06 ŞUBAT 2023 KAHRAMANMARAŞ (PAZARCIK, ELBİSTAN)  
DEPREMLERİ SONRASINDA MALATYA ÖZELİNDEKİ YIĞMA YAPILARDA  
HASAR OLUŞUMUNUN DEĞERLENDİRMESİ

**Melek AKGÜL, Serkan ETLİ..... 1**

## Bölüm 2

BEŞİNCİ NESİL TEKNOLOJİSİ (5G), KÜRESEL NAVİGASYON UYDU  
SİSTEMİ (GNSS) VE ANTEN YAPILARI

**Cihan DÖĞÜŞGEN ERBAŞ..... 23**

## Bölüm 3

SİBER GÜVENLİKTE MAKİNE ÖĞRENİMİ DÖNEMİ

**Ebubekir SEYYARER, Faruk AYATA..... 39**

## Bölüm 4

PEYNİR ALTI SUYUNUN KESİKLİ BİYOREAKTÖRDE ARITIMI

**Nesrin DURSUN..... 53**

## Bölüm 5

TAŞIMA ENTEGRASYONLARININ İNCELENMESİ VE KIYASLANMASI

**Onur DERSE..... 69**

## Bölüm 6

BENTONİTLERİN OLUŞUMU, SINIFLANDIRILMASI VE KULLANIM  
ALANLARI

**Onur Eser KÖK, Adil ÖZDEMİR, Yasin ERDOĞAN..... 81**

## Bölüm 7

DESENLİ DİSK İLE HIZLI KATILAŞTIRILMIŞ AL-7075 ALAŞIMLARININ  
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

**M. Fatih KILIÇASLAN, Ümit YILMAZ,  
Bekir AKGÜL, Yasin YILMAZ..... 99**

Bölüm 8

BİNGÖL İLİ İLKÖĞRETİM YAPILARI İÇ MEKÂN HAVA KALİTESİ  
PARAMETRELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

***Fatma KÜRÜM VAROLGÜNEŞ, ..... 109***

***Perihan ÇULUN, Gonca ÖZER YAMAN..... 109***

Bölüm 9

MAKİNE ÖĞRENMESİNDEKİ DOĞRUSAL REGRESYON MODELLERİNİN  
İNCELENMESİ

***Yunus DEMİR ..... 137***

# Bölüm 1

06 ŞUBAT 2023 KAHRAMANMARAŞ  
(PAZARCIK, ELBİSTAN) DEPREMLERİ  
SONRASINDA MALATYA ÖZELİNDEKİ  
YIĞMA YAPILARDA HASAR OLUŞUMUNUN  
DEĞERLENDİRMESİ

*Melek AKGÜL<sup>1</sup>, Serkan ETLİ<sup>2</sup>*

---

1 Munzur Üniversitesi Tunceli MYO, Tunceli, Orcid: 0000-0001-8815-3762

2 Munzur Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Tunceli, Orcid:0000-0003-3093-4106

## 1. Giriş

Türkiye'nin coğrafi sınırlarına dair deprem bölgelerinin tespitine yönelik ilk çalışma Sieberg tarafından 1932'de yapılmıştır. Az sayıda veri ve çalışma ile desteklenerek hazırlanan bu haritada, yalnızca deprem bölgeleri ve faylar değil konum tespitini kolaylaştırıcı nehirler, göller ve hatta yerleşim bölgelerinin isimleri de kullanılmıştır. Haritanın en dikkat çekici özelliği Kuzey Anadolu Fayı (KAF)'nın olmaması ve bugün bu fay zone üzerinde olduğu bilinen bazı bölgelerin deprem bölgesi olarak nitelendirilmemesidir. Ayrıca Konya ve Ankara bu haritada deprem bölgesinde kabul edilmiştir (Şekill).

Aktif fay hatlarının etkisinde olan Türkiye'nin ilk resmi deprem bölgeleri haritası "1945-Yersarsıntısı Bölgeleri Haritası"dır. Bu harita Türkiye'yi, üç bölgeye ayırarak değerlendirmiş olsa da zaman ve değişen bilimsel/teknolojik gelişmelere bağlı olarak en sonuncusu 2018'de olmak üzere birçok kez güncellenmiştir. 27 Aralık 1939 Erzincan depreminin ardından yaklaşık 5 yıllık bir sürece yayılan ve çok sayıda can kaybının yanı sıra maddi ve manevi zarara yol açan; Niksar-Erbaa (1942), Adapazarı-Hendek (1943), Tosya-Ladik (1943) ve Bolu-Gerede (1944) depremleri 1945-Yersarsıntısı Bölgeleri Haritası'nın gerekliliğine zemin hazırlamıştır. Türkiye'nin bu ilk deprem haritasını destekleyici nitelikteki "Yersarsıntılarında Evvel ve Sonra Alınacak Tedbirler Hakkında Kanun"da 1944 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu bağlamda ilk yasal düzenleme olmak bakımından büyük önem arz eden bu Kanun çerçevesinde Türkiye'de deprem tehlikesi ve olası risklerin belirlenmesi için hem merkezi hem de yerel yönetimlerin yetki, örgütlenme, yapılaşma ve sorumluluklarını şekillendirilmiştir. Türkiye için 1944 yılı sonrasında da resmi olmayan birçok deprem bölgeleri haritası hazırlanmıştır (Özmen, 2012).

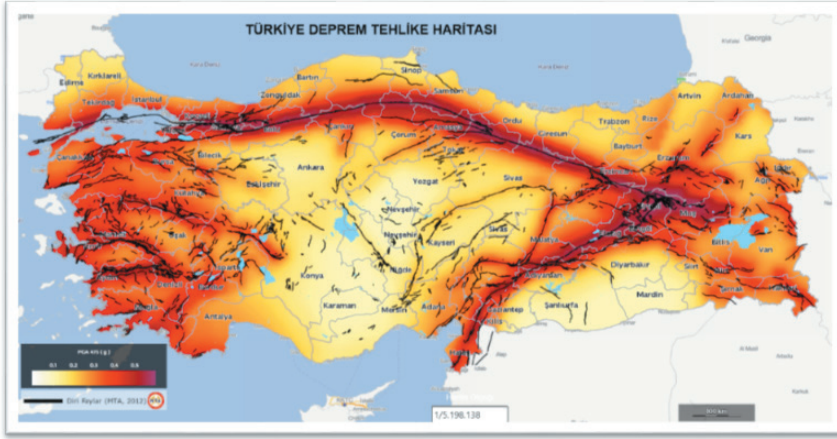


**Şekil 1.** 1932 tarihli Sieberg tarafından hazırlanmış deprem bölgeleri haritası (Akkar vd., 2018)

1945 ve 1996 yıl aralığında hem deprem mühendisliği ve mühendislik sismolojisindeki gelişmelerin, hem de aktif tektonik ve sismotektonik bulguların artması; hasar sonuçlu depremler hakkında mevcut bilgi ve kayıtlarında çeşitlenmesini sağlamıştır. Bu gelişmeler ışığında Deprem Bölgeleri Haritası Bakanlar Kurulu kararına istinaden 5 kez değişikliğe uğramıştır. Bu tarih aralığında resmi olarak hazırlanmış Türkiye Deprem Haritaları yöntem esasına göre 3 grup altında inceler. Bunlar;

- Hasar verisine göre (1945, 1947)
- Deterministik yöntemine göre (1963, 1972)
- Olasılık yöntemine göre (1996) (Özmen, 2012).

8 Mart 2018 tarihli Resmi Gazete’de yayınlanan ve 1 Ocak 2019’da yürürlüğe giren Türkiye Deprem Tehlike Haritası, Türkiye’nin en güncel ve resmi deprem tehlike haritasıdır (Şekil 2) (AFAD, 2018).



Şekil 2. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD, 2018)

Türkiye’de Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS) ve Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS)’nin etkisi ile yaşanan depremler yıkım ve hasar verme kapasitesi yüksek depremlerdir. Yıkıcı etkisi yüksek olan 1939 ve 1992 Erzincan, 1999 Kocaeli ve Düzce Depremleri KAFS’de; 1998 Adana-Ceyhan, 2003 Bingöl, 2010 Elazığ-Kovancılar ve 2011 Van, 2020 Elâzığ Depremleri DAFS’de yaşanmıştır (Yön, ve Onat, 2017; Akgül ve Doğan, 2020).

Şubat 2004 Çelikhan (Adıyaman) depreminden Ocak 2020 Elazığ (Sivrice) depremine kadar geçen son 16 yılda Doğu Anadolu Fay Zonunda gerilmenin arttığı ve bu kesimlerin bir hazırlık evresine girmiş olduğu kanısı yaygındır. Ocak 2020 Elazığ (Sivrice) depremi artan gerilmenin açığa çıkması olarak kabul edilmektedir. Ancak gerilmenin devam ettiği yönünde kabul ve değerlendirmeler Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin ve sonrasında beklenen depremlerin varlığını destekler niteliktedir (Demirtaş, 2019, Akgül ve Doğan, 2020).

## 2. Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) Depreminin Özellikleri

### 2.1.Yer Hareketinin Karakteristik Özelliği

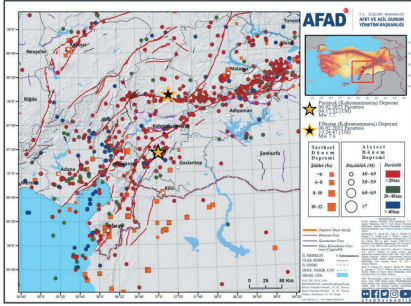
06.02.2023 tarihinde Türkiye yerel saati ile 04:17 ve 13:24’de merkez üssü Kahramanmaraş (Pazarcık ve Elbistan) olmak üzere büyüklüğü sırasıyla Mw 7.7 ve Mw 7.6 olan iki deprem meydana gelmiştir. 7.7 ve 7.6 büyüklüğündeki depremlerin derinlikleri sırasıyla 8.6 km ve 7 km’dir. Depremlerin en yakın yerleşim birimlerine olan uzaklıkları Tablo 1’deki gibidir. Ana şok sonrası 09 Şubat 2023 günü yerel saat ile 16:00’ya kadar yaklaşık 1300 deprem kaydı alınmıştır (AFAD, 2023-a).



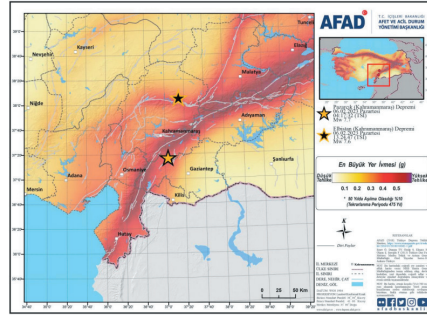


## 2.2. Bölgenin Deprem Tehlikesi ve Geçmiş Döneme Dair Deprem Aktivitesi

1900 yılından sonra Kahramanmaraş merkez üssü olan 06.02.2023 tarihli 2 depreme ( $M_w$  7.7,  $M_w$  7.6) kadar bu bölge için en büyüğü 6.0 olmak üzere 224 adet  $M \geq 4.0$  deprem kaydı mevcuttur. Ayrıca 1900 yılı öncesinde, 75 adet tarihsel dönem depremi meydana geldiği kayıtlar ile sabittir (Şekil 4). Bölgenin deprem tehlikesi Türkiye Deprem Tehlike Haritası üzerinde Şekil 5'te verildiği gibidir (AFAD, 2023-a).



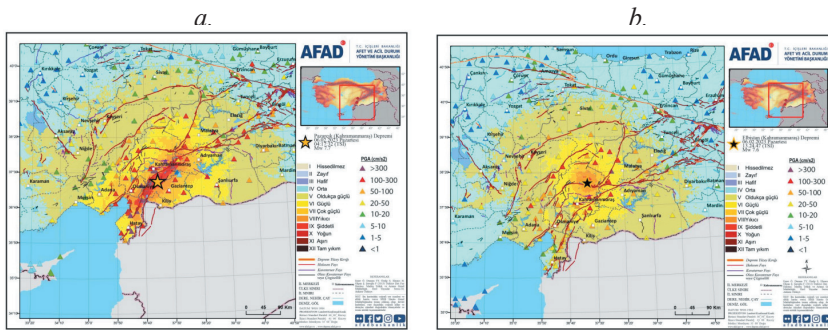
Şekil 4. Bölgenin tarihsel ve aletsel dönem deprem aktivitesi (AFAD, 2023-a)



Şekil 5. Bölgenin deprem tehlikesi (AFAD, 2023-a)

## 2.3. Depremin Şiddeti ve Ölçülen İvme Değerleri

Şiddet haritası Deprem Ön Hasar Tahmin Sistemi (AFAD-RED) kullanılarak üretilir. Buna göre  $M_w$  7.7 büyüklüğündeki deprem için merkez üssüne en yakın, Türkiye sınırları içerisindeki, yerleşim yerinde depremin şiddeti MMI XI;  $M_w$  7.6 büyüklüğündeki depremin şiddeti ise MMI X olarak tespit edilmiştir (Şekil 6). Sismik şiddet değerlendirmesinin yanı sıra ön hasar kestirimleri, herhangi bir saha gözlem verisine dayanmamakla beraber ampirik bağıntılar ile otomatik olarak hesaplanmıştır (AFAD, 2023-a).



Şekil 5.1 Mw 7.7 büyüklüğündeki depremin AFAD-RED tahmini şiddet haritası

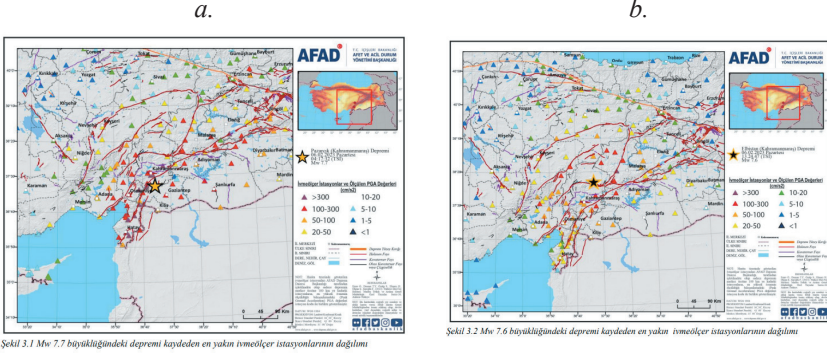
Şekil 5.2 Mw 7.6 büyüklüğündeki depremin AFAD-RED tahmini şiddet haritası

## Şekil 6. AFAD-RED tahmini şiddet haritası

(a) Mw 7.7 büyüklüğündeki deprem (b) Mw 7.6 büyüklüğündeki deprem (AFAD, 2023-a)



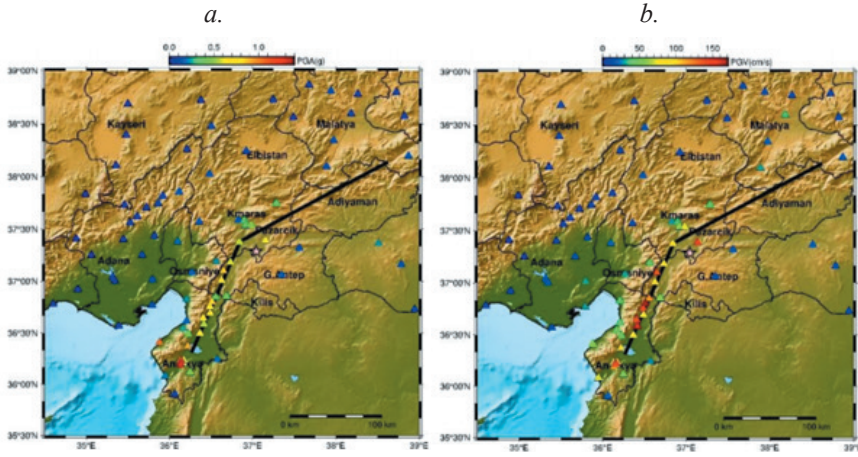
112 adet ivmeölçer verisine bağlı olarak elde edilen ön değerlendirme sonuçları, en büyük ivme değerini 38.41 gal olarak vermektedir. Ayrıca Şekil 7’de depremin merkez üssüne en yakın olan 5 ivmeölçer istasyonunun ölçtüğü ivme değerleri verilmiştir (AFAD, 2023-a).



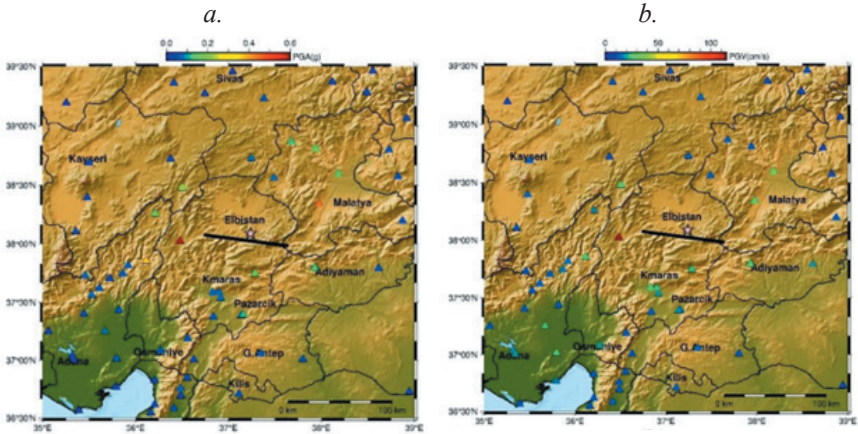
**Şekil 7. Depremleri kaydeden en yakın ivmeölçer istasyonunun dağılımı**  
**(a) Mw 7.7. büyüklüğündeki deprem (b) Mw 7.6 büyüklüğünde deprem (AFAD, 2023-a)**

#### 2.4. Depremlerde Kaydedilen Maksimum Yer Hareketi Parametrelerinin Mekânsal Dağılımları

Şekil 8 ve 9 sırasıyla Mw 7.7 ve Mw 7.6 olan Kahramanmaraş depremlerinde kaydedilen maksimum yer ivmesi ve maksimum yer hızı değerleri için istasyon bazlı mekansal dağılımı vermektedir. Şekil 8’e göre en yüksek maksimum yer ivmesi değerleri Hatay Antakya’da kaydedilmiştir. Ayrıca kayıtlara göre Kahramanmaraş, Gaziantep, Osmaniye, Kilis ve Hatay illerini de içeren Kuzey-Güney yönünde 500-1000  $\text{cm/s}^2$  aralığında değişen maksimum yer ivmesi verisi vardır. Maksimum yer hızı değerlerinin dağılımının maksimum yer ivmesi dağılımına göre daha homojen olduğu ve yırtılma istikametindeki tüm istasyonlarda çok yüksek yer hızı değerleri bulunduğu gözlemlenmiştir. Mw 7.6 depremi (Elbistan) Mw 7.7 depremi (Pazarcık) kadar yoğun bir istasyon ağında kaydedilmemiştir. Fayda meydana gelen yırtılmanın ilk depremin kuzey istikametinde olması (Şekil 9) bu depremin etkilerinin kuzey yönünde bulunan Kahramanmaraş ilinin yanı sıra Adıyaman, Malatya ve Kayseri illerinde de daha fark edilebilir düzeye taşımıştır. Mw 7.6 depremi (Elbistan) için, en yüksek yer hareketi şiddeti değerleri genellikle Kahramanmaraş’ta gözlemlenmiştir (ODTÜ, 2023).



**Şekil 8.** Mw 7.7 depremi için (a) maksimum yer ivmesi (b) maksimum yer hızı değerlerinin mekânsal dağılımı (ODTÜ, 2023)

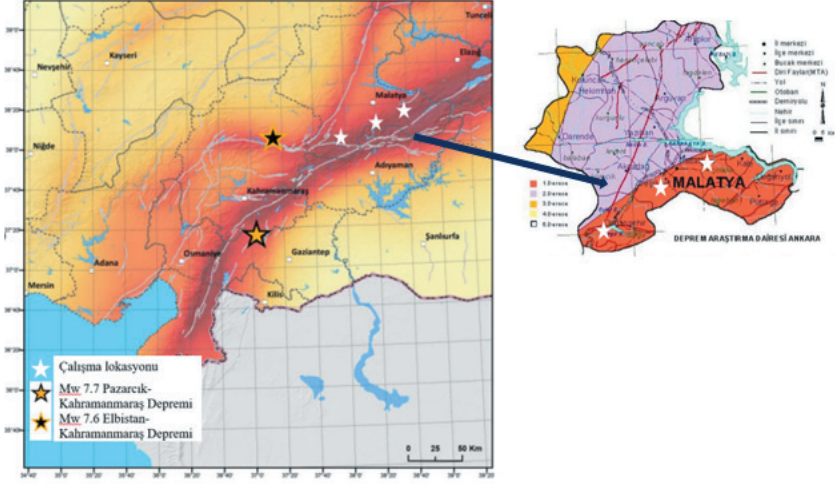


**Şekil 9.** Mw 7.6 depremi için (a) maksimum yer ivmesi (b) maksimum yer hızı değerlerinin mekânsal dağılımı (ODTÜ, 2023)

### 3. Saha Çalışması

AFAD artçı deprem listesine göre Kahramanmaraş depremlerinin ardından 26 Şubat 2023 (00:00) tarihine kadar 9.236 artçı deprem meydana gelmiştir (AFAD, 2023-b). Kahramanmaraş-Pazarcık ve Kahramanmaraş-Elbistan merkezli depremler sonrası etkilenen bölgelerde 25 Şubat 2023 tarihi itibarı ile 830 bin 783 binada hasar tespit çalışması yürütülmüş ve etkilenen 11 ilde toplam 105 bin 794 bina acil yıkılması gereken, ağır hasarlı ve yıkık olarak kaydedilmiştir. Kahramanmaraş merkezli bu iki deprem sonrası Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın 25.02.2023 tarihli verilerine göre; Malatya ilinde %98 oranında tamamlanan hasar tespit çalışmalarında yaklaşık 64 bin 883 binada hasar tespiti yapılmış ve 4 bin bina yıkılmış ya da acil yıkılacak olarak raporlanmıştır.

Türkiye Deprem Tehlike Haritası'na göre DAF üzerinde ve 1. derece riskli deprem bölgesi olan Malatya ilinin Doğanşehir, Yeşilyurt ve Battalgazi ilçeleri bu çalışmanın lokasyonu olarak seçilmiştir. Şekil 10 çalışma lokasyonunun depremselliği ve Kahramanmaraş depremlerine olan konumunu vermektedir.



**Şekil 10.** Çalışma lokasyonu ve Kahramanmaraş depremleri (AFAD-a, 2023; MTA, 2023-b)

Yığma yapılar taşıyıcı sistemi genellikle düşey duvarlardan oluşan kargir malzemeler ile tahsis edilen yapılardır. Türkiye’de, yığma yapılar özellikle kırsal bölgelerde yönetmelik usul ve esaslarının göz ardı edildiği, yerel kaynak ve teknoloji ile genellikle 1990 öncesi inşa edilmiş yapılardır. Yığma yapılara etki eden en önemli dinamikler deprem kuvvetleridir ve depremler sonrası yığma yapılarda meydana gelmesi olası hasarlar büyük ölçeklidir. Deprem gibi hasar gücü yüksek yanıl etkilerin tespiti ve değerlendirilmesi için gerçekleştirilmiş birçok çalışmada; lokal saha tespiti-nin yanı sıra yapısal eksikliklerden sismik hareket yönü ve yönetmelik ihlallerine kadar geniş parametreler dizisinde değerlendirmeler mevcuttur (Ayala ve Speranza, 2003; Akgül ve Doğan, 2020; Göker ve Karaşin, 2015; Keskin ve Bozdoğan, 2018; Koç, 2016; Sayın vd., 2014; Jagadish vd., 2003; Jitendra ve Hiçyılmaz, 2008; Öztürk, 2018).

Malatya ili, Kahramanmaraş merkezli 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen iki büyük deprem sonrası etkilenen 11 ilden en fazla yığma yapı sto-kuna sahip olan illerdendir. Bölgedeki yığma yapılar kullanılan malzeme ve yapım tekniğine dayalı olarak büyük oranda değişkenlik göstermekte-dir. Bu durum kayıtlanan hasar türleri arasında da farklılıklar yaratmıştır.

### 3.1. Yığma Yapılara Genel Bakış

Yapılan saha çalışmasına göre bölgede farklı kat sayısında yığma yapı stoku hakimdir. Bu durumun yanı sıra yapılarda çeşitli seviyelerde hasar durumları (hasarsız, az hasarlı, ağır hasarlı, yıkık) kaydedilmiştir (Şekil 11).



**Şekil 11.** Mevcut yapılarda hasar seviyeleri  
(a) hasarsız yapı (b) az hasarlı yapı (c) ağır hasarlı yapı (d) yıkık yapı

Malatya ili özelinde yığma yapılarda kullanılan malzeme ve uygulama yöntemi çok çeşitlilik göstermektedir. Delikli tuğla, harman tuğlası ve moloz taşlardan oluşan malzeme çeşitliği; donatısız ve kuşatılmış yığma yapı esasları ile inşa edilmiştir (Şekil 11 ve 12). Ayrıca bağlayıcı malzeme olarak toprak harcı, çimento harcı ve melez harç kullanımı yaygındır.

Donatısız yığma yapıların yaygın olduğu bölgede yapılar büyük oranda taş, tuğla ve kerpiç malzeme ile kalifiye olmayan işçilik esasıyla tahsis edilmiştir (Şekil 11). Yapının ilerleyen kullanım ve servis ömrüne bağlı olarak farklı kat ve eklentilerinde değişken özellikte malzeme kullanımı söz konusudur (Şekil 12.a).

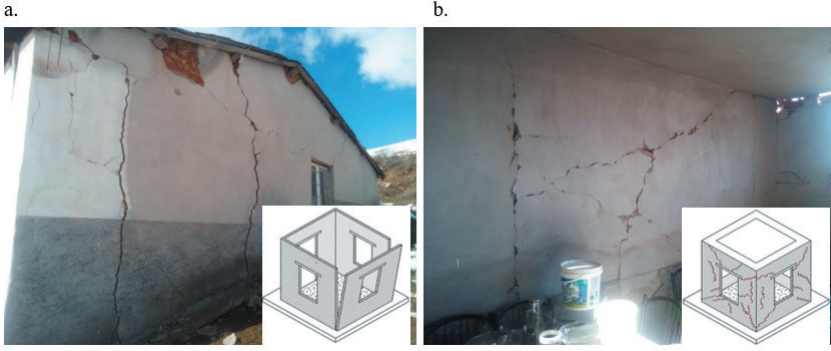


**Şekil 12.** Yığma yapı örnekleri (a) donatısız yığma yapı (b) kuşatılmış yığma yapı



### 3.2. Yığma Yapılarda Hasar Mekanizmaları

Yığma yapılar betonarme ve çelik yapılardan beklenen sünek davranışı sergileyemediği için genellikle depreme dayanıklı yapı olarak nitelendirilmez. Deprem hasarları yığma yapılarda; düzlem dışı davranış, düzlem içi davranış ve bu iki davranışın birlikte gözlemlendiği durumları içeren ana başlıklar ile değerlendirilmektedir (Oyguc ve Oyguc, 2017). Şekil 13'te yığma yapıların saha çalışmalarında raporlanan düzlem içi ve düzlem dışı davranışlarına istinaden literatürde tanımlanan hasar durumları birlikte verilmiştir.

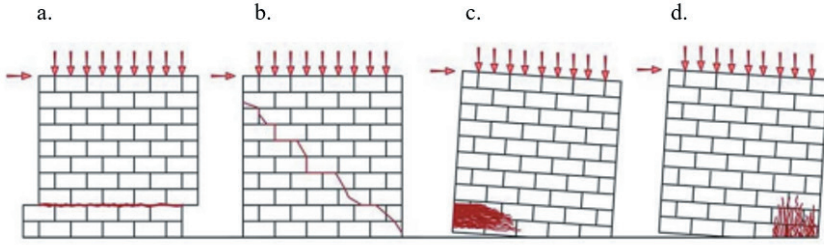


**Şekil 13. Yapısal hasar durumları**  
(a) Düzlem dışı davranış (b) Düzlem içi davranış (Oyguc, 2017)

#### 3.2.1. Düzlem içi davranışa bağlı yapısal hasarlar

Düzlem içi davranışlar; sismik yük maruziyeti sonrası yığma yapının taşıyıcı duvarlarında göçme modları ile tanımlanmaktadır (Şekil 14). Aşırı eğilme ya da kesme kuvveti farklı düzlem içi hasar türlerine sebep olmaktadır. Düzlem içi davranışa etki eden yük kombinasyonu, taşıyıcı duvar geometrisine, malzeme bileşenine ve yüklemenin doğasına (monotonik veya çevrimsel) bağlıdır (Zhuge, ve ark., 1998).

Bunlara ilaveten söz konusu hasar oluşumu, yığma yapının geometrisinden, yükseklik/genişlik oranından ve malzemenin kalitesinden etkilenir (Tomazevic, 2000; Ayala ve Speranza, 2003). Farklı malzeme özelliklerine sahip yığma yapıların verildiği Şekil 15'te; taşıyıcı duvar doğrultusunda (düzlem içi) etki eden sismik yükün yapı tabanında yarattığı ezilme hasarı raporlanmıştır.



**Şekil 14.** Düzlem içi sismik yüke maruz kalan bir yığma duvardaki tipik göçme modları:

(a) kayma kesme hasarı (b) diyagonal çekme hasarı (c) devrilme (d) tabanda ezilme (Oyguç, 2017)



**Şekil 15.** Tabanda ezilmeye bağlı yapısal hasarlar

### 3.2.2. Düzlem dışı davranışa bağlı yapısal hasarlar

Yığma sistemlerde sismik hareket taşıyıcı yığma duvarlara dik doğrultuda etkidiğinde düzlem dışı davranışlar meydana gelir. Özellikle mertekler ya da betonarme döşeme ile tutulmamış taşıyıcı yığma duvarlarda derin çatlaklar ve hatta göçmeler beklenen hasar düzeyleridir. Şekil 16'da zayıf ve değişken malzeme özelliklerinin yanı sıra eksik ve hatalı köşe bağlantılarının düzlem dışı davranışı verilmiştir.



**Şekil 16.** Düzlem dışı davranışa bağlı yapısal hasarlar

### 3.2.3. Malzeme özelliklerine bağlı yapısal hasarlar

Çalışma lokasyonunda yığma yapılar genellikle malzeme kalitesi düşük ve coğrafi şartlar dahilinde bölgeden temin edilen moloz taşların zayıf bağlayıcılık ve kalifiye olmayan işçilik ile çoğu zaman yatay ahşap hatıl kullanılması ile oluşturulmuştur (Şekil 17.a).

Buna ilaveten kerpiçten yapılmış yığma yapılarda tamir, tadilat ihtiyacının yanı sıra yer yer oluşturulan eklentilerde genellikle delikli ya da harman tuğlası ve bağlayıcı olarak çimento harcı kullanımı yaygındır. Taşıyıcı duvar ve/veya bölümlerden oluşan bu eklentiler yapıda yatay ve/veya düşey düzensizliklere neden olmaktadır. Düşük kaliteli kargir malzeme kullanımı değişken mekanik ve boyutsal özelliklere neden olup, yığma sistemlerde devrilme ve göçme riskini arttırmıştır (Şekil 17.b ve 17.c). 2018 TBDY’nde yığma yapıların taşıyıcı duvarlarında kullanılan kargir malzemeler sınırlandırmıştır (TBDY, 2018; Akgül ve Doğan, 2019). Ancak bölgedeki yığma yapı stoku büyük oranda yapı yaşı itibarı ile bu sınırlandırılan ve yasaklanan kargir malzemeler ile inşa edilmiştir.



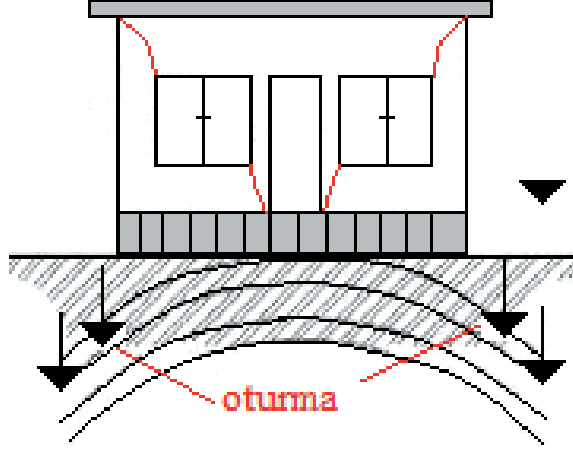


**Şekil 17.** *Malzeme özelliklerine bağlı yapısal hasarlar*

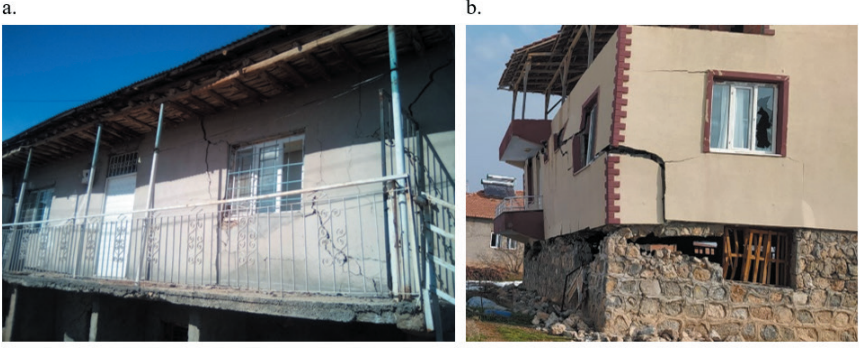
Genellikle eksik ya da hiç alınmayan mimari ve mühendislik hizmetinin yaygın olduğu yığma yapı stoku bu bölgede; kerpiç, moloz taş ve tuğla gibi kargir malzemelerin düşük bağlayıcılık özelliğine sahip çamur harcı, melez harç ve çimento harcı ile düzensiz ve gelişigüzel oluşturulmuş taşıyıcı duvar sistemine dayanır. Bölgedeki yığma yapıların taşıyıcı birimlerinde malzeme aderansının da zayıf olması çoğu göçme ve hasar durumunun düzeyini arttırmıştır. Tüm bu malzeme özelliklerinin sonucu olarak farklı rijitliğe sahip duvarlarda; düzlem içi, düzlem dışı ve zayıf köşe bağlantı noktalarında önemli hasar ve göçmeler kaydedilmiştir.

#### **3.2.4. Farklı zemin oturmalarına bağlı yapısal hasarlar**

Zemin oturmalarına bağlı olarak yığma yapılarda özellikle taşıyıcı yığma duvarlarda oturma çatlakları meydana gelir. Şekil 18 zemin kaynaklı oturmalar sonrası yığma yapılarda davranış şeklini temsil etmektedir (Döndüren vd., 2017). Taşıyıcı sistemi gevrek kargir malzeme ile oluşturulan yığma yapılarda bu durum çatlak, yarılma bazen de göçme hasarı ile sonuçlanır. Çalışma lokasyonunda bazı yerleşim alanlarında farklı zemin oturmaları ve yerel harekete bağlı olarak ötelenmelerden dolayı çatlaklar tespit edilmiştir. Bu durum özellikle Şekil 19. b’de örneği verilen yapı sistemlerinde; malzeme farklılığına bağlı olarak, aynı düzeyde rijit davranışı sergileyemeyen kargir malzemelerde, farklı şekilde hasar durumu ile ortaya çıkmaktadır. Bu tarz uygulamalarda özellikle katlar arası geçişte köşe birleşim hattında belirginleşen ayrılmalar söz konusudur.



Şekil 18. Zemine bağlı oturmalarla ilgili yapı davranışı (Döndüren vd., 2017)



Şekil 19. Farklı zemin oturmalarına bağlı yapısal hasarlar

#### 3.2.4. Kapı pencere boşluğuna bağlı oluşan yapısal hasarlar

Yığma yapılarda kapı ve pencerelerin taşıyıcı duvar köşelerine yakın olma durumu ve fazla kapı pencere boşlukları özellikle kapı/pencere köşe bölgelerinde gözlenen kesme çatlaklarına sebep olmaktadır. Şekil 20’de taşıyıcı duvarları tuğla ve kerpiç ile tahsis edilmiş yığma yapılarda kesme çatlağına bağlı hasar durumları verilmiştir.

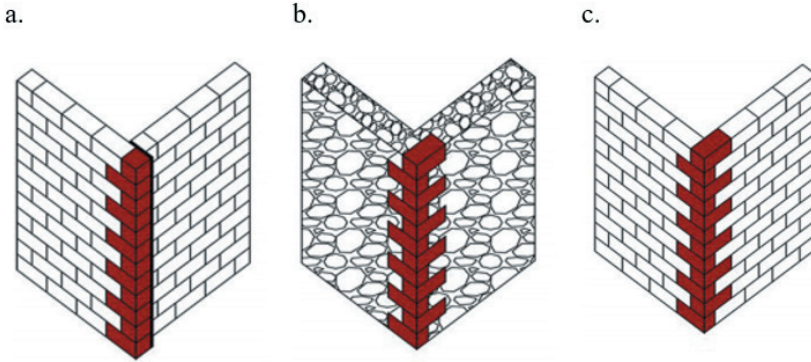
Planda düzensiz yerleşim ve pencere/kapı boşluklarının yönetmelik usul ve esaslarında verilen sınır durumlardan fazla olması yığma yapılarda belirgin hasara neden olmaktadır. Saha gözlemlerine göre; yığma yapılardaki deprem hasarı en fazla gerilme yığılmalarının olduğu kapı ve pencere boşluklarında gözlemlenmiştir.



Şekil 20. Kapı pencere boşluğu kesme çatlağına bağlı yapısal hasarlar

### 3.2.6. Duvar-duvar, duvar-döşeme birleşim hasarları

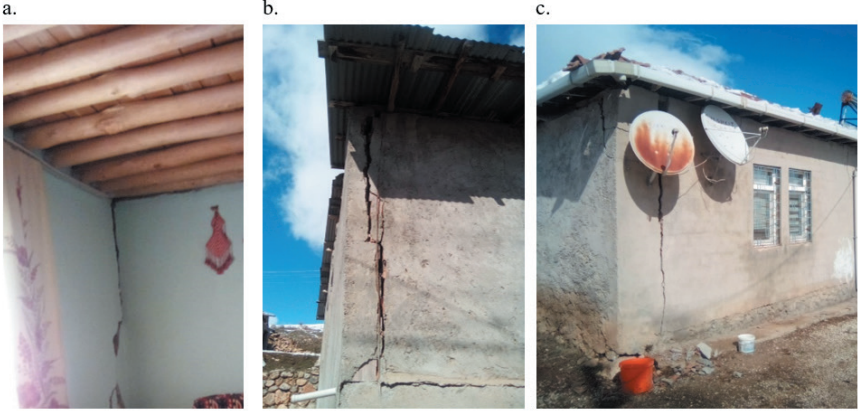
Saha çalışmasında Şekil 21’de verilen duvarların köşe detaylarına bağlı hasar durumları değerlendirilerek tespitler yapılmıştır (Ayala ve Speranza, 2003; Oyguc, 2017).



Şekil 21. Duvar-duvar köşe detayları:  
(a) kilit taşı eksikliği (b) yetersiz kilitlenme (c) yeterli birleşim (Oyguc, 2017)

Bölgedeki yığma yapılarda özellikle duvar-duvar ve duvar-döşeme köşe birleşimlerinde kilit taşı eksikliği ve yetersiz birleşime bağlı olarak

hasarlar söz konusudur. Ayrıca Şekil 22’de verilmiş kerpiç ve tuğla duvarlarda duvarın sadece bir yüzeyinde değil tüm duvar derinliğince devam eden duvar-duvar köşe birleşim hasarları genellikle devam eden artçılar sonrası göçme ile raporlanmıştır.



**Şekil 22.** Yetersiz duvar-duvar ve duvar-döşeme birleşimlerine bağlı yapısal hasarlar

### 3.2.7. Boyutsal özellikleri uygun olmayan elemanlara bağlı yapısal hasarlar

2018 TBDY, yığma binalarda taşıyıcı yığma duvarlar için desteklenmemiş mesafeler ve düşey hatıllar için gerekli mesafeleri sınırlandırarak sunmaktadır (TBDY, 2018). Bölgenin saha çalışmalarında; yatay ve düşey hatıl kullanımında konstrüktif kurallara uyulmayışının yanı sıra hatalı hatıl yerleşim düzeninden ya da hiç hatıl kullanılmamış olmasından kaynaklı olarak, desteksiz uzun duvarların ve büyük kapı, pencere boşluklarının varlığı söz konusudur (Şekil 23 ve 24). Şekil 24’te yapının bütüncül hasar düzeyi düşük olmasına rağmen desteksiz çatı sistemi ve boyutsal özellikleri uygun olmayan duvar sistemine bağlı hasarlar söz konusudur.





**Şekil 23.** Uygun olmayan boyutsal eleman (duvar sistemi) özelliklerine bağlı yapısal hasarlar



**Şekil 24.** Uygun olmayan boyutsal eleman (çatı sistemi) özelliklerine bağlı yapısal hasarlar

### 3.2.8. Yetersiz çatı-duvar bağlantı hasarı

Yığma yapılarda çatı ve duvar bağlantı tahsisinin yanlış ya da yetersiz olmasına bağlı olarak meydana gelen hasarlar döşemesi betonarme olmayan, mertekli ya da merteksiz yığma yapılarda daha fazladır.

Bunun yanı sıra mertek altı yatay hatıl eksikliğine bağlı olarak, mertek-duvar birleşim bölgelerinde çekme çatlakları ile hasar oluşumları yaygındır (Şekil 25).



**Şekil 25.** *Yetersiz çatı-duvar bağlantısına bağlı yapısal hasarlar*

### 3.2.9. Döşeme türüne bağlı hasar durumları

TDY 2007'ye göre ahşap hatıllar sadece kerpiç yapılarda kullanılabilirken taş, tuğla ve türevi malzemelerin kullanımında betonarme hatılların kullanımı gerekli kabul edilmiştir (TDY, 2007). Ayrıca TBDY-2018'e göre taşıyıcı yığma duvarlarda desteklenmemiş uzunluklar sınırlandırılmıştır (TBDY, 2018). Yatay ve düşey betonarme hatıl kullanımının yaygın olmadığı bölgede birçok yığma yapı inşa edilme tarihi itibarı ile 1990 ve öncesine dayanır. Yatay ve/veya düşey hatılların eksikliğine bağlı olarak taşıyıcı duvarlarda mesnetsiz ve desteklenmemiş duvar boyu ve duvar alanı genellikle düzlem dışı hasarlara neden olmuştur. Bölgede sayıca sınırlı olmasına rağmen yatay ve düşey betonarme hatıl kullanımı raporlanmıştır ve bu yapılarda hasar düzeyleri görece daha düşüktür.

Yığma yapılarda göçme davranışı döşeme durumlarına bağlı olarak farklı modeller ile değerlendirilmektedir. Yığma yapıların döşemesiz, mertekli ve betonarme döşemeli olmasına bağlı olarak hasar düzeyleri üzerinde etkilidir (Şekil 26).





**Şekil 26.** Yığma duvarlarda döşeme türüne bağlı düzlem içi/dışı göçme modelleri  
(a) döşemesiz (b) mertekli (c) betonarme döşemeli (Akgül ve Doğan, 2020)

## KAYNAKÇA

- AFAD (2018). Türkiye Deprem Tehlike Haritası. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı. Ankara.
- AFAD (2023-a). Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw 7.7 Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7.6 Depremlerine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı. Ankara.
- AFAD (2023-b). AFAD Son Depremler. Erişim: <https://deprem.afad.gov.tr> Erişim Tarihi: 25 Şubat 2023
- Akgül, M. & Doğan, O. (2019). Yığma yapılarda güçlendirme yöntemleri ve TBDY- 2018'de yığma yapılar. Munzur 1. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, Tunceli, Türkiye.
- Akgül, M. & Doğan, O. (2020). 4 Nisan 2019 Elazığ-Sivrice Depreminin Yığma Yapılara Etkisinin Değerlendirilmesi. International Journal of Engineering Research and Development, 12 (1), 265-277. doi: 10.29137/umagd.621701
- Akkar, S., Azak, T., Çan, T., Çeken, U., Demircioğlu Tümsa, M. B., Duman, T. Y., Erdik, M., Ergintav, S., Kadirioğlu, F. T., Kalafat, D., Kale, Ö., Kartal, R. F., Kekovalı, K., Kılıç, T., Özalp, S., Altuncu Poyraz, S., Şeşetyan, K., Tekin, S., Yakut, A., Yılmaz, M. T., Yüçemen M. S. & Zülfikar Ö. Evolution of seismic hazard maps in Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8):3197-3228 doi:10.1007/s10518-018-0349-1
- Ayala, D.D. & Speranza, E. (2003). Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of historic masonry buildings. Earthquake Spectra, 19-3, 479-509
- Demirtaş, R. (2019). 04 Nisan 2019 Sivrice (Elazığ) depremi (Mw 5.2) ve Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin gelecek deprem potansiyeli. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi (AFAD). doi: 10.13140/ RG.2.2.35050.57281
- Döndüren, M.S., Şişik, Ö. & Demiröz, A. (2017). Tarihi Yapılarda Görülen Hasar Türleri, Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi, 13, 45-58
- Göker, Ş. & Karaşin, A. (2015). Depremde hasar gören kırsal yapılar için bir yapısal hasar değerlendirmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi, 6(1), 31-38
- Jagadish, K. S., Raghunath, S. & Nanjunda Rao, K.S. (2003). Behaviour of masonry structures during the Bhuj earthquake of january 2001. Journal of Earth System Science, 112(3), 431-440
- Jitendra, K. B. & Hiçyılmaz, K. M. O. (2008). General Observations Of Building Behaviour During The 8th October 2005 Pakistan Earthquake. Bulletin Of The New Zealand Society For Earthquake Engineering, 41(4). doi:10.5459/ bnzsee.41.4.209-233
- Keskin, E. & Bozdoğan, K. B. (2018). 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli Özelinde Değerlendirilmesi. Kırklareli Üniversitesi Mühen-

- dislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 4 (1), 74-90. Retrieved from <https://dergi-park.org.tr/tr/pub/klujes/issue/37436/421614>
- Koç, V. (2016). Depreme Maruz Kalmış Yığma ve Kırsal Yapı Davranışlarının İncelenerek Yığma Yapı Yapımında Dikkat Edilmesi Gereken Kuralların Derlenmesi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2 (1), 36-57. doi: 10.28979/comufbed.307874
- ODTÜ. (2023). ODTÜ 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık Mw=7.7 ve Elbistan Mw=7.6 Depremleri Ön Değerlendirme Raporu. Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi. METU/EERC 2023-01, 28,29.
- Oyguc, R. & Oyguc, E. (2017). 2011 Van earthquakes: Lessons from damaged masonry structures. Journal of Performance of Constructed Facilities, 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001057.
- Oyguç, R.A. (2017). 2011 Van depremlerinden sonra yığma yapılarda gözlemlenen hasarlar. BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi, 19(2), 296-315. doi: 10.25092/baunfbed.348482
- Özmen, B. (2012). Türkiye deprem bölgeleri haritalarının tarihsel gelişimi. Geological Bulletin of Turkey, 55(1), 43-55
- Öztürk, M. (2018). 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Türkiye deprem Tehlike haritası ile ilgili İç Anadolu Bölgesi bazında bir değerlendirme. Selçuk-Teknik Dergisi, 17(2), 31-42
- Sayın, E., Yön, B., Calayır, Y. & Gör, M. (2014). Construction failures of masonry and adobe buildings during the 2011 Van earthquakes in Turkey. Structural Engineering and Mechanics, 51(3), 503-518. doi:10.12989/sem.2014.51.3.503
- TDY-2007. (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara.
- TBDY-2018. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara.
- Tomazevic, M. (2000). Shaking table tests of small-scale models of masonry buildings: advantages and disadvantages. Massivbau 2000: Forschung, Entwicklungen, Anwendungen.
- MTA. (2023-a). Doğu Anadolu Fay Sisteminin ana segmentleri. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Erişim: mta.gov.tr, Erişim Tairhi: 20 Şubat 2023
- MTA. (2023-b). Diri fay haritaları. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Erişim: mta.gov.tr. Erişim Tarihi: 20 Şubat 2023.
- Yön, B. & Onat, O. (2017). 3 Aralık 2015 Bingöl-Kığı depreminin Tunceli ilindeki yığma yapılara etkisinin değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9 (1), 375-385.
- Zhuge, Y., Thambiratnam, D. & Corderoy, J. (1998). Nonlinear dynamic analysis of unreinforced masonry. Journal of Structural Engineering, 124(3), 270-277.

## Bölüm 2

### BEŞİNCİ NESİL TEKNOLOJİSİ (5G), KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMİ (GNSS) VE ANTEN YAPILARI

*Cihan DÖĞÜŞGEN ERBAŞ<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, cihan.dogusgen@yeniuyuzuil.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-1977-3567

## 1. GİRİŞ

Beşinci Nesil Teknolojisi (Fifth Generation-5G), geniş bantlı hücresel ağlar için beşinci nesil teknoloji standardıdır. 1980’lerde 1G ile sesli aramalar, 1990’larda 2G ile mesajlaşmalar, 1990’lar ve 2000’lerin başlarında 3G ile sınırlı multimedya, metin ve internet veri transferi ve 2000’lerin sonlarında ise 4G sayesinde çeşitli cihazlar kullanılarak dinamik bilgilere dayanan gerçek verilere ulaşmak mümkün olmuştur. 5G günümüzde kullanılan birçok kablosuz cihazda yer alan 4G’ nin yerini almaktadır. 5G, 4G’ nin bir devamı olmaktan çok yüksek veri hızı, düşük bekleme süresi, kitlesel bağlantı, ağ güvenliği ve enerji verimliliği özellikleri bakımından yenilikçi bir yapıya sahiptir. Bahsedilen özellikler nesnelerin interneti, teletıp, akıllı şehirlerin yönetimi, artırılmış sanal gerçeklik ve küresel konumlandırma gibi uygulamalarda yer almaktadır. Çok büyük boyutlu veriler, özellikle yüksek çözünürlüklü ve üç boyutlu videolar çok daha fazla insana yüksek hızlarda aktarılabilir. 5G teknolojisine ait bilgiler Bölüm 2 altında sunulmuştur.

Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System-GNSS), iki veya üç boyutlu konum bilgisini küresel olarak sağlayan uydu navigasyon sistemidir ve üç bölümden oluşur: Uydu kümesi (uzay bölümü), yer kontrol/izleme ağı (kontrol bölümü) ve kullanıcılara ait alıcılar (kullanıcı bölümü). Kontrol bölümü uyduları izler, çalışma durumlarını denetler ve yörünge düzeninin devamlılığını sağlar. Ayrıca uydu saatini düzeltir ve diğer parametreleri günceller. Kullanıcı bölümü GNSS işaretlerini işleyen bir alıcıdır ve kullanıcının yerini, hızını ve zamanını belirler. Günümüzde ABD’ ye ait Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System-GPS), Avrupa Birliği’ ne ait Galileo, Rus GLONASS ve Çin’ e ait BeiDou 2 sistemleri de mevcut olup bu sistemler Bölüm 3 altında ayrıntılı olarak incelenmiştir.

GNSS’ nin özellikle şehir bölgelerindeki konumlandırma doğruluğunu artırmak için 5G’ nin sağlayabileceği konumlandırma özelliği ile entegrasyonu üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu entegrasyona ait bilgiler Bölüm 4 altında sunulmuştur.

5G ve GNSS’ e ait literatürde yer alan çeşitli anten geometrileri ve performans parametreleri ise Bölüm 5 altında incelenmiştir.

## 2. 5G

### 2.1. 5G Kullanım Senaryoları ve Gereksinimleri

5G gereksinimleri geniş bant genişliği, yeni dalga şekilleri, geniş anten dizileri ve ağ yoğunlaştırılması yardımıyla karşılanmaktadır. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği Radyo İletişim Sektörü (ITU-R) tarafından 5G ağları, cihazları ve hizmetleri için çeşitli gereksinimler yayın-



lanmıştır. Bu gereksinimler, Uluslararası Mobil Telekomünikasyon-2020 Hedef Belgesi' nde (IMT-2020) listelenmiştir. ITU-R, IMT-2020' de yayımladığı yol haritasında; 2016 yılına kadar vizyonu belirleme, 2017 yılı ortalarına kadar gereksinimleri belirleme, 2020 yılına kadar standartların geliştirilmesi ve sonrası için ise standartların yayılması ve genişletilmesi hedeflerini belirlemiştir.

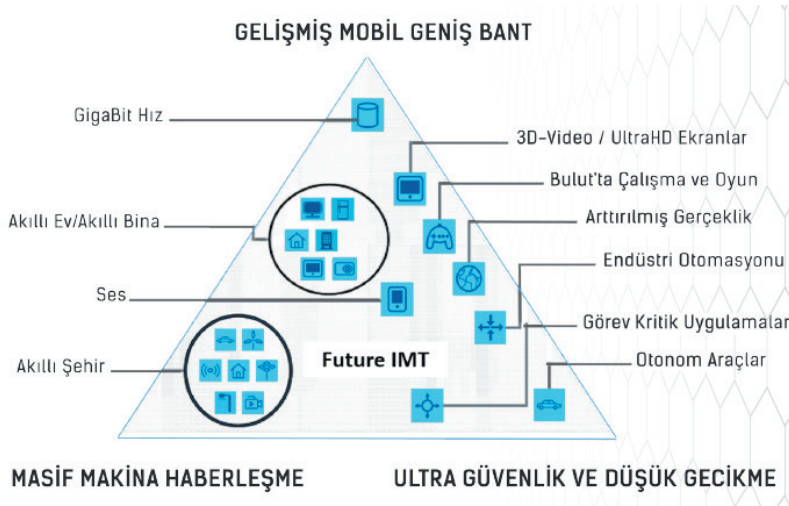
IMT-2020, farklı kullanım senaryolarını üç geniş kategori altında desteklemektedir (bkz. Şekil 1):

1) Gelişmiş mobil genişbant (Enhanced mobile broadband-eMBB): Bu kullanım senaryosu, geniş alan kapsamı ve kablosuz erişim noktalarını içeren farklı durumları içermektedir. Geniş alan kapsamı durumu için kusursuz kapsama, yüksek mobilite ve halihazırda var olandan daha gelişmiş kullanıcı veri oranları istenir. Kablosuz erişim noktaları durumu için ise yüksek kullanıcı yoğunluğu ve çok yüksek trafik kapasitesi gereklidir fakat mobilite gereksinimi sadece yaya hızı için geçerlidir. Çok büyük boyutlu verilerin, özellikle yüksek çözünürlüklü ve üç boyutlu videoların çok daha fazla insana yüksek hızlarda aktarılabilme imkanı mevcuttur.

2) Masif makine haberleşmesi (Massive machine type communications-mMTC): Trafik yapılarının henüz tam olarak karakterize edilmediği bir uygulama grubudur. Ancak, bir mMTC yapısının, gecikmeye duyarlı olmayan az miktarda veriye sahip çok sayıda cihazdan oluşması öngörülmüştür. Cihazların düşük maliyetli ve uzun batarya ömürlü olması gerekmektedir. Özellikle akıllı şehirler, akıllı ev, dağınık sensörler gibi uygulamalar mMTC teknolojisi üzerine kurulmuştur.

3) Ultra-güvenilir ve çok düşük gecikmeli haberleşme (URLLC): Bu teknolojide güvenilirlik, gecikme ve kapsama için katı gereksinimler mevcuttur. Örnek olarak otonom araçlar, uzaktan ameliyat, endüstri otomasyonu ve ulaşım güvenliği uygulamaları verilebilir.

Bu üç alanda yer alacak olan radyo erişim teknolojilerinin mevcut teknolojilerden bağımsız, geriye uyumluluk aranmadan tasarlanacağı öngörülmüştür. Bu bağlamda, 5G için; tanımsal olarak her cihaz tipini, her uygulama çeşidini destekleyen, ortak protokollerle tek ya da çok yönlü haberleşme platformları için IP tabanlı tek bir heterojen ağ denilebilir. 5G için IMT 2020 Hedef Belgesi' nde belirtilen minimum teknik performans gereksinimleri Tablo 1' de sunulmuştur.



Şekil 1: IMT-2020 kullanım senaryoları [1].

## 2.2. 5G Frekans Tahsisi

5G birden çok frekans bandında kullanılmaktadır. Orta bantlar olarak adlandırılan 6 GHz ve altındaki frekans bantları halihazırda kablosuz haberleşme sistemleri için kullanımda olmakla birlikte 5G için de mevcuttur. Bunun dışında, 24 GHz-100 GHz aralığındaki milimetre dalga spektrumunda yer alan alt frekans bantları WRC-19 tarafından onaylanmıştır [3]. Bahsedilen aralık içerisindeki GHz cinsinden 24.25-27.5; 37-43.5; 45.5-47; 47.2-48.2; 66-71 alt frekans bantları belirlenerek uygunluk için onay verilmiştir. İlgili alt frekans bantları sayesinde 24 GHz üstünde önemli miktarda yeni bant genişlikleri tanımlanmıştır. Belirli frekans bantlarının kombinasyonu 5G için önemlidir. Örneğin, geniş alan kapsamı için orta bantların, yerel ve kişisel alan haberleşmeleri için ise yüksek veri oranlı

Tablo 1: 5G için IMT 2020 Hedef Belgesi'nde belirtilen minimum teknik performans gereksinimleri [2].

| Parametre                      | Kullanım Durumu | Değer                                                                                                                                                               |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Maksimum veri oranı            | eMBB            | UYB*=20 Gbps, YUB*:10 Gbps                                                                                                                                          |
| Maksimum spektrum verimliliği  | eMBB            | UYB: 30 bps/Hz, YUB: 15 bps/Hz                                                                                                                                      |
| Kullanıcı deneyimli veri oranı | eMBB            | UYB: 0.3 bps/Hz, YUB: 0.21 bps/Hz (iç mekan kablosuz erişim)<br>UYB: 0.225 bps/Hz, YUB: 0.15 bps/Hz (yoğun kentsel)<br>UYB: 0.12 bps/Hz, YUB: 0.045 bps/Hz (kırsal) |

|                               |             |                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ortalama spektrum verimliliği | eMBB        | UYB: 9 bps/Hz/TRxP, YUB: 6.75 bps/Hz/TRxP (iç mekan kablosuz erişim)<br>UYB: 7.8 bps/Hz/TRxP, YUB: 5.4 bps/Hz/TRxP (yoğun kentsel)<br>UYB: 3.3 bps/Hz/TRxP, YUB: 1.6 bps/Hz/TRxP (kırsal) |
| Alan trafik kapasitesi        | eMBB        | UYB: 10 Mbps/m <sup>2</sup> (iç mekan kablosuz erişim)                                                                                                                                    |
| Kullanıcı düzlemi gecikmesi   | eMBB, URLLC | eMBB için 4 ms, URLLC için 1 ms                                                                                                                                                           |
| Kontrol düzlemi gecikmesi     | eMBB, URLLC | eMBB ve URLLC için 20 ms                                                                                                                                                                  |
| Bağlantı yoğunluğu            | mMTC        | 1000000 cihaz/km <sup>2</sup>                                                                                                                                                             |
| Enerji verimi                 | eMBB        | Yüksek uyku oranı ve uzun uyku süresi için destek yeteneği                                                                                                                                |
| Güvenilirlik                  | URLLC       | 1 ms içinde 32 byte katman 2 protokolü veri ünitesi aktarımı için $1-10^{-5}$ başarı olasılığı                                                                                            |
| Mobilite                      | eMBB        | 500 km/h değerine kadar                                                                                                                                                                   |
| Mobilite kesinti süresi       | eMBB, URLLC | 0 ms                                                                                                                                                                                      |
| Bant genişliği                | eMBB        | En az 100 MHz, yüksek frekans bantları (6 GHz üstü) için 1 GHz' e kadar                                                                                                                   |

\*UYB: Uydı-yer bağı

\*YUB: Yer-uydu bağı

milimetre dalga frekanslarının kullanımı mümkün olabilir [4].

### 2.3. 5G Denemeleri

5G standardizasyonu hala erken bir evrede olsa da 5G prototipleri, deneme ortamları ve 5G denemeleri son yıllarda ivme kazanmıştır. Üniversiteler, araştırma enstitüleri ve mobil operatörler tüm dünyada çalışmalarına devam etmektedir. Orta bantlarda yapılan denemeler, teorik çalışmalarca tahmin edilen performans parametrelerine gerçek hayatta ulaşılabileceğini göstermiştir. Tablo 2, 5G denemeleri öncesi belirlenen örnek hedef kriterlerinin halihazırda kullanımda olan LTE teknolojisi ile olan karşılaştırmasını sunmaktadır.

Tablo 2: 5G denemeleri öncesi belirlenen örnek hedef kriterleri ve LTE teknolojisi karşılaştırması [2].

| Parametre                                  | 5G Denemeleri Öncesi Hedef | LTE         |
|--------------------------------------------|----------------------------|-------------|
| Alt taşıyıcı aralığı                       | 75 kHz                     | 15 kHz      |
| Örnekleme zamanı                           | 6.5 ns                     | 32.5 ns     |
| Örnekleme oranı                            | 153.6 M sps                | 30.72 M sps |
| Alt çerçeve uzunluğu                       | 0.2 ms                     | 1 ms        |
| Alt çerçeve başına düşen OFDM simge sayısı | 14                         | 14          |
| Çerçeve uzunluğu                           | 10 ms                      | 10 ms       |
| Çerçeve başına düşen alt çerçeve sayısı    | 50                         | 10          |

Ülkemizde mobil operatörler tarafından 5G teknolojisi için öncelikli frekanslar arasında yer alan, 3.5 GHz merkez frekansı ile karakterize edilen 3.3 GHz-3.8 GHz frekans bandında çeşitli denemeler yapılmıştır. 5G teknolojinin temel kapsama bantlarından biri olabilecek 3.5 GHz frekans bandı, sahip olduğu bant genişliği ve yayılım mesafesi ile 5G teknolojilerinin lider bandı olarak standartlarda yerini almıştır. Hem kapsama hem de yüksek hız kapasite ihtiyacını karşılayabilecek en uygun bant olan 3.5 GHz frekans bandı test edilerek, bu bandın sahip olduğu kapsama ve performans getirileri gözlenmiştir. Bu testler ile 3.5 GHz bandının ve çoklu anten teknolojinin kapasiteye ve performansa olan etkisinin 5G'ye giden yoldaki önemi analiz edilmiştir. Yine bu frekans bandında tanımlanan Zaman Bölmeli Çoklama (Time Division Duplexing) teknolojinin verimliliğini artıran yoğun alıcı-verici anten teknolojisi olan Masif Çoklu Giriş-Çoklu Çıkış (Massive MIMO) ile yüksek hızlara erişmenin mümkün olacağı görülmüştür [5].

Ülkemizde faaliyette bulunan mobil operatörleri Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu' na (BTK) yaptıkları başvurular sonucu 2017 yılından itibaren 5G deneme izinlerini almışlardır. İzinler kapsamında Vodafone Türkiye 3.5 GHz ve 3.7 GHz, Turkcell 3.5 GHz ve 26 GHz, Türk Telekom ise 3.5 GHz, 26 GHz-28 GHz ve C-bandı frekanslarında 5G deneme izinlerine sahiplerdir. 2021 yılında BTK, Netaş firmasına da 5G deneme izni vermiştir. İzin sürecinin ardından, bahsedilen mobil operatörler 5G denemelerine başlamışlardır. Tablo 3, bu denemeleri gerçekleştiren mobil operatörleri, denemelerin yapıldığı yılları ve kullanılan çalışma frekanslarını listelemektedir. Tablo 3 incelendiğinde, üç mobil operatörün de 3.5 GHz çalışma frekansında deneme gerçekleştirdiği görülmektedir. Ülkemizde 5G için öncelikli olarak 3.5 GHz frekansı tercih edilmiştir.

*Tablo 3: Mobil operatörler tarafından gerçekleştirilen 5G denemeleri.*

| Mobil Operatör   | 5G Deneme Yılı | 5G Çalışma Frekansı |
|------------------|----------------|---------------------|
| Vodafone Türkiye | 2017           | 3.5 GHz             |
| Turkcell         | 2018           | 3.5 GHz             |
| Türk Telekom     | 2019           | 3.5 GHz             |
| Türk Telekom     | 2021           | 26 GHz              |

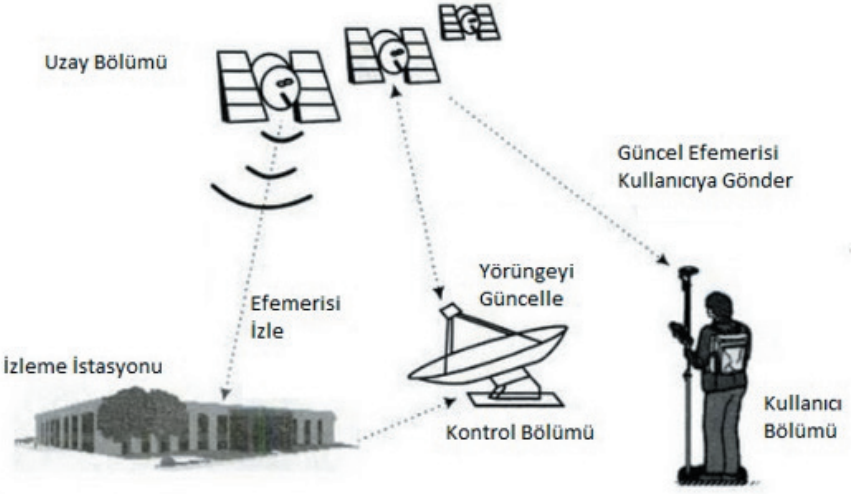
Bu çalışma frekansında yapılan kapsama ve kapasite denemelerinin yanı sıra çok yüksek veri iletim hızı ve noktasal dikey sektör kapsama gereksinimini karşılama amacıyla Türk Telekom firması tarafından 26 GHz çalışma frekansında da denemeler gerçekleştirilmiştir [5].

### 3. GNSS

GNSS alıcıları *trilaterasyon* adı verilen bir yöntem yardımıyla bir nesnenin yerini enlem, boylam, yükseklik, hız, yön ve zaman vererek bulabilir. Trilaterasyon ile bir nesnenin konumu, bu nesnenin yeri bilinen di-

ğer nesnelere olan uzaklığı ölçülerek hesaplanır. Alıcının yerinin belirlenebilmesi için alıcı iki bilgiye sahip olmalıdır. Bunlar, uyduların uzaydaki yeri ile uydular ve alıcı arasındaki mesafedir.

GNSS alıcısı uyduların uzaydaki yerini *almanak* ve *efemeris* adı verilen iki bilgi ile elde eder. Almanak bilgisi uyduların uzaydaki yaklaşık yer bilgisini içerir. Sürekli olarak iletilir ve GNSS alıcısında saklanır. Almanak bilgisi ile GNSS alıcısı uyduların yörüngesini ve her uydunun nerede olması gerektiğini bilir. Uydular az da olsa yörüngelerinden sapabilir. GNSS kontrol bölümü düzeltilmiş yer bilgisini uydulara göndererek yörüngeyi günceller. Düzeltilmiş kesin yer bilgisine *efemeris* denir. Efemeris bilgisi en fazla 6 saat geçerlidir ve GNSS alıcısına kodlanmış biçimde gönderilir. İzleme istasyonu ise efemerisi izlemek ve yer kontrol bölümüne aktarmakla yükümlüdür. GNSS bölümleri Şekil 2’ de verilmiştir.



Şekil 2: GNSS bölümleri ve işleyişi.

Uydular ve alıcı arasındaki mesafe hesabı için basit uzaklık formülü kullanılır:

$$d=c.\Delta t \quad (1)$$

d: uydusu ve alıcı arasındaki mesafe [m]

c: ışık hızı  $=3.10^8$  [m/sn]

$\Delta t$ : uydusu işaretinin alıcıya gelmesi için gereken zaman [sn]

O halde d mesafesinin bulunması için  $\Delta t$  zamanının bilinmesi yeterlidir. Bu zaman bilgisi uydusu tarafından gönderilen kodlanmış işarette bulunmaktadır. İletilen kod gürültüye benzediğinden *Sahte rasgele gürültü* (SRG) - *Pseudo-random noise* olarak adlandırılır. Bir uydusu SRG üretti-

ğinde alıcı da aynı işareti üreterek uydunun işaretiyle eşleştirmeye çalışır. Alıcı daha sonra iki kodu karşılaştırarak eşleşme için kendi kodunun zamanda ne kadar kayması gerektiğini (yani  $\Delta t$  süresini) belirler. Bu süreyi ışık hızıyla çarparak d mesafesini bulur.

Şu ana kadar en iyi bilinen ve en çok kullanılan GNSS, ABD tarafından 1970' li yıllarda icat edilip tasarlanan ve 1990' lı yıllardan beri kullanılan GPS' tir. GNSS modern hayat içerisindeki birçok uygulama kapsamında (savunma ve sivil koruma, tarım, ulaşım, eğlence vs) hayati bir yer almaktadır. GPS' ten sonra birkaç GNSS tasarlanmış ve kullanıma alınmaktadır. Bu sistemler Avrupa Birliği' ne ait Galileo, Rus GLONASS ve Çin' e ait BeiDou 2 sistemleridir.

### 3.1.GPS

GPS projesi 1973 yılında ABD Savunma Bakanlığı tarafından, küresel kapsama ve sürekli kullanılabilirlik özelliklerine sahip bir konumlandırma sistemini tasarlama ve konuşlandırma amacıyla başlatılmıştır. GPS öncelikli olarak askeri amaçlar için düşünülmüş, 1983 yılında sivil kullanıcılar da kapsamıştır.

GPS uydu kümesinde, yer merkezli toplam 6 yörüngede (her bir yörüngede 5 veya 6 uydu olacak şekilde) 31 adet uydu bulunmaktadır. Bir uydunun yörüngesel periyodu 11 saat 58 dakikadır. Yörüngeler yaklaşık olarak daireseldir ve ekvator etrafında  $60^\circ$  lik eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Her bir yörüngenin yarıçapı 26600 km dir. GPS 24 saat küresel navigasyon ve zaman belirleme kapasitesine sahiptir. GPS iki amaç için kullanılmaktadır: Standart konumlandırma servisi ve kesinlikli konumlandırma servisi. Standart konumlandırma servisi sivil halk için tasarlanmış iken kesinlikli konumlandırma servisi ABD ordusu ve devlet kurumları için ayrılmıştır.

#### 3.1.1. Frekans Planı

GPS frekans planı Şekil 3' te verilmiştir . Frekans planında, ayrılmış bant genişlikleri ve farklı GPS bantları için kullanılan isimler sunulmuştur. GPS uzay bölümü ile kullanıcı bölümü arasındaki güncel arayüz, farklı taşıyıcı frekanslarındaki iki RF link içermektedir. Bahsedilen taşıyıcı frekansları L1 (1575.42 MHz) ve L2 (1227.60 MHz) şeklindedir. Ayrıca 1176.45 MHz' de çalışan ek bir L5 frekansı on iki uydu ile halihazırda mevcut olup yirmi dört uydu ile tamamen kullanımının 2024 yılında olması planlanmaktadır. Frekanslar,  $f_0=10.23$  MHz olarak verilen temel GPS frekansının katları şeklindedir:

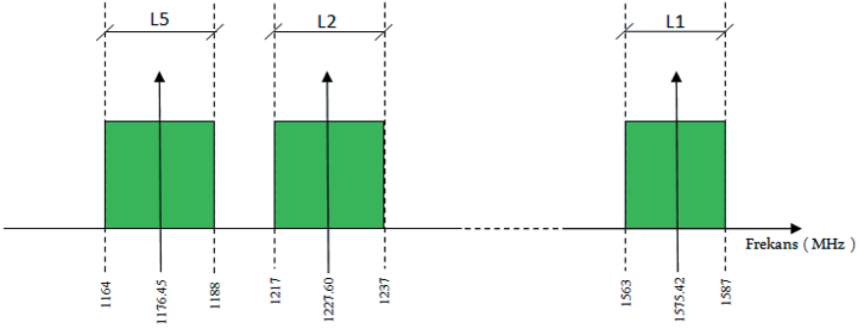
$$f_{L1}=1575.42 \text{ MHz}=154.f_0$$

$$f_{L2}=1227.60 \text{ MHz}=120.f_0 \quad (2)$$



$$f_{L5}=1176.45 \text{ MHz}=115.f_0$$

$f_0=10.23 \text{ MHz}$  frekansı, yerdeki bir kullanıcıya görünen nominal frekanstır. Uydu hareketinden kaynaklanan göreceli etkileri kompanse etmek için uydu fırlatılmadan önce, üzerindeki osilatörlerin temel GPS frekansı  $f_{0\_osilatör}=10.22999999543 \text{ MHz}$  olarak ayarlanır. Böylece yerdeki bir GPS alıcısının tam olarak  $f_0$  frekansındaki saat işaretini alması sağlanır. Fakat yerdeki kullanıcı tarafından alınan L1, L2 ve L5 taşıyıcılarının osilasyon frekansı, verici ve alıcının göreceli hareketinden doğan Doppler kayması nedeniyle zamanda değişir. Bu frekans kayma miktarı  $\pm 5 \text{ kHz}$  mertebesinde ve alıcı tarafından kompanse edilir.



Şekil 3: GPS frekans planı.

### 3.2. Galileo

Galileo, Avrupa Birliği'ne ait ve sivil denetim altında küresel konumlandırma sağlayan bir GNSS'tir. GPS ve GLONASS ile uyumludur. Galileo programı 26 Mayıs 2003 tarihinde Avrupa Birliği ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından başlatılmıştır. Sistem otuz adet yer yörüngeli uydudan (yirmi dört çalışan ve altı yedek) oluşur. Uydular üç adet, yerden 23222 km yükseklikte dairesel yörüngeler üzerine oturtulmuştur. Galileo öncül servisleri 2016 yılının sonlarında çalışır hale gelmiştir. 25 Temmuz 2018 tarihinden beri yörünge testleri devam etmektedir [6]. Navigasyon işaretlerinin  $75^\circ$  kuzey enleminde ve ötesinde bile kapsama sağlaması hedeflenmektedir.

Galileo sisteminin beş farklı alanda servis sağlayacaktır:

- Ücretsiz konumlandırma, navigasyon ve zamanlama görevlerini diğer GNSS'lerle uyumlu bir biçimde ve GPS ile rekabet edebilecek düzeyde gerçekleştirmesi
- Sivil havacılık, denizcilik ve demiryolu alanlarında can güvenliğine katkıda bulunulması
- Kriptolanmış navigasyon bilgisinin yayılması, kesin zamanlama

servisleri, kontrollü giriş gibi uygulamalarla ticari fayda sağlanması

- Avrupa Birliği ülkelerine yönelik, stratejik öneme sahip faaliyet ve kritik uygulamalar (savunma/sivil koruma) için halka açık, düzenlenmiş servislerin sağlanması

- CORPAS-SARSAT sistemine, acil konum işaretlerini belirlemek suretiyle yardım ederek arama-kurtarmada görev alınması

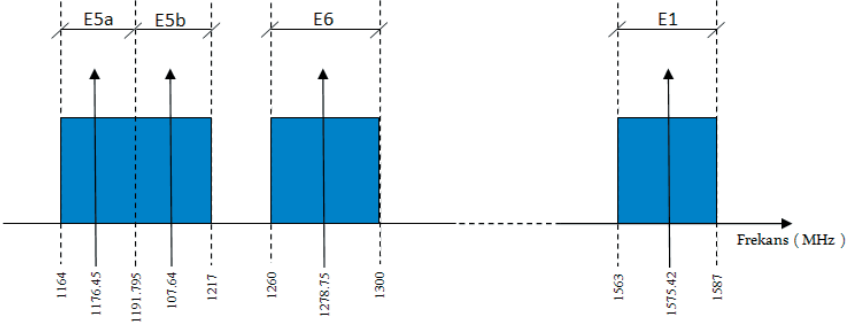
### 3.2.1. Frekans Planı

Galileo sistemine ait frekans planı Şekil 4' te gösterilmiştir. E5, E6 ve E1 olarak adlandırılan üç ayrı işaret uydular tarafından gönderilir. E5 linki ayrıca E5a ve E5b olmak üzere iki RF linke ayrılır. Galileo frekans bantları, navigasyon uydu servisleri için ayrılmış spektrumdan seçilmiştir. Buna ilaveten, E5a, E5b ve L1 bantları, güvenlik kritikliğine sahip uygulamalar için sivil havacılar tarafından kullanılan havacılık navigasyon servislerine yönelik ayrılmış spektrumda yer almaktadır. Tüm Galileo uyduları aynı frekans bantlarını kullanır; böylece kod bölmeli çoklu erişim (KBÇE) yönteminin kullanılması mümkün olur.

E1 işareti, L1 bandında iletilen herkese açık bir işarettir. Tüm kullanıcılara açık kriptosuz kod ve navigasyon bilgisine sahiptir. E1 işareti, bir önceki bölümde bahsedilen açık ve ticari servisler ile can güvenliğine katkıda bulunma amacıyla kullanılır.

E6 işareti, E6B ve E6C bilgi kanallarına sahip olan E6 bandında iletilen, ticari girişe izin veren bir işarettir (ticari faydaya yöneliktir). İçerdiği bilgi kriptolanmıştır.

E5a işareti, bir bilgi kanalı ve bir pilot kanal içeren E5 bandında iletilen, herkese açık bir işarettir. E5a işareti tüm kullanıcılar tarafından alınabilen kriptosuz navigasyon bilgisi içerir. Navigasyon ve zamanlama fonksiyonlarını desteklemek için temel bilgi iletir. E5b işareti de herkese açıktır ve yine E5 bandında iletilir. Tüm kullanıcılara açık kriptosuz seyrüsefer bilgisini bulundurmakla birlikte kriptolanmış ticari bilgiye de sahiptir.



Şekil 4: Galileo frekans planı.

### 3.3. GLONASS

GLONASS, eski Sovyetler Birliği tarafından ordu ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanmıştır. Sistemin kurulmasına 1976 yılında başlanmış, tam kullanıma 1995 yılında geçilmiştir. 1995’ te L1 bandında iletim yapan toplam yirmi dört uydu bulunmaktaydı. Daha sonraki yıllarda Rus ekonomisinin çöküşü sistem verimliliğini düşürdü fakat günümüzde modernizasyon çalışmaları devam etmektedir.

#### 3.3.1.Frekans Planı

GLONASS uyduları, GPS ile kıyaslandığında L1 ve L2 bantlarının farklı bölgelerinde işaret gönderir. L1 bandındaki çalışma frekans aralığı 1598.0625 MHz-1609.3125 MHz iken, L2 bandındaki çalışma frekans aralığı 1242.9375 MHz-1251.6875 MHz şeklindedir.

### 3.4. BeiDou-2

BeiDou-2, Çin tarafından geliştirilen ve küresel konumlama, navigasyon ve zamanlama fonksiyonlarını yerine getiren bir sistemdir. Toplam otuz beş adet uydu yerden 35786 km yükseklikte yer almaktadır. Aralık 2011 itibariyle BeiDou-2 sistemi on adet uydulla Asya-Pasifik bölgesinde çalışmaya başlamıştır. 2012 yılında adet uydu daha eklenmiştir.

#### 3.4.1.Frekans Planı

BeiDou-2 işaretleri B1, B2 ve B3 frekans bantlarında iletilmektedir. B1 bandında 4 MHz alıcı bant genişlikli taşıyıcı frekans 1561.098 MHz iken B2 bandında alıcı bant genişliği 24 MHz ve taşıyıcı frekans 1207.14 MHz (Galileo sistemindeki E5b işaretine karşılık gelir) mertebesinde-dir. B3 bandında ise alıcı bant genişliği yine 24 MHz ve taşıyıcı frekans 1268.52 MHz’ dir.

Yukarıda bahsedilen GNSS' lerin haricinde Hindistan tarafından geliştirilmekte olan, bölgesel nitelikte IRNSS sistemi de bulunmaktadır. Ayrıca GPS' in doğruluk ve kullanılrlığını artırma amaçlı ABD tarafından geliştirilen WAAS, Avrupa Birliğı tarafından kullanılan EGNOS, Japonya tarafından geliştirilen MSAS, Hindistan tarafından kullanılan GAGAN sistemleri mevcuttur. Güney Kore ve Çin de GPS' in doğruluk ve kullanılrlığını ilerletmek için kendi sistemlerini geliştireceklerini sırasıyla 2013 ve 2014 yıllarında açıklamıştır.

#### 4. 5G VE GNSS' NİN BİRLİKTE KULLANIMI

Günümüzde insanların/araçların konumlandırılması ve navigasyonu toplum için bir ihtiyaç haline gelmiştir. Gerçek zamanlı, hassas konum hesabı endüstriyel uygulamalar, kamu güvenliğı, yardımcı teknolojiler ve eğlence amaçlı uygulamalar için bir temel oluşturmaktadır.

Dış mekan uygulamaları için GNSS gerçek zamanlı, otonom konumlandırma sağlamaktadır. Dış mekandaki standart noktasal konumlandırma küresel olarak gerçekleştirilmiş, metre boyutunda doğruluk elde edilmiştir. Ancak, yoğun yerleşimli şehir bölgelerinde yüksek doğruluklu konumlandırma hala ulaşılması gereken bir hedef durumundadır. Binalar, altgeçitler, hareketli araçlar ve bitki örtüsü uydulardan gelen işaretleri engelleyerek zayıf ve hatta çözümlenemeyen geometrilere yol açmaktadır. Buna ek olarak, şehir ortamında sıkça rastlanan metal ve cam gibi yansıtıcı yüzeyler çok yolluluğa sebep olarak düşük maliyetli alıcılarda önemli hatalar doğurmaktadır.

Dolayısıyla, yoğun yerleşimli şehir bölgelerinde GNSS çözümüne ek olarak farklı konumlandırma yolları gerekmektedir. 5G, kullanıcının yüksek doğruluklu konumunu desimetre seviyesinde bir doğrulukla hesaplayabilecek konumlandırma yöntemlerine sahiptir. Dolayısıyla, 5G konumlandırma yöntemleri bir hibrit uydu sistemi içerisine entegre edilerek elde edilecek konumlandırma performansının kalitesi ve güvenilirliğı artırılabilir [7]. Bu konuyla ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur [8-11].

#### 5.5G VE GNSS ANTENLERİ

Literatürde birçok 5G ve GNSS anten geometrisi incelenmiş ve raporlanmıştır. Bu bölümde 5G ve GNSS' e ait, literatürde yer alan bazı anten yapıları ve özellikleri sunulmuştur.

##### 5.1. 5G Antenleri

Bir çalışmada [12], dikedörtgensel yamaya sahip bir mikroşerit antende bir dikedörtgensel yarık ve yamanın bir kenarına eklenmiş yay şeklinde metal eklenti kullanılarak 5G için uygun olan 4.5 GHz-5.5 GHz frekans aralığında çalışma sağlanmıştır. Anten aynı zamanda 3.3 GHz-4.2 GHz

arasında da çalıştığından, yapının sabit uydu hizmeti için de kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada [13], yamasında H ve T şeklinde yarıklara sahip bir dikdörtgensel mikroşerit yama anten 37 GHz rezonans frekansında, 5G hücreli iletişim için tasarlanmıştır. Rezonans frekansında empedans bant genişliği %16.22 ve anten kazancı 8.25 dBi olarak bulunmuştur. Patanvaria ve Chatterjee [14] 5G uygulamasına yönelik olarak fiyonk şeklinde yaması olan ve yamada iki köşegenel yarıklı bir mikroşerit yama anten önermişlerdir. Anten rezonans frekansı 27.77 GHz olup bu frekanstaki kazanç 7 dBi ve empedans bant genişliği %74 değerlerindedir. Kim ve Kim [15] milimetrik dalga 5G uygulaması için bir ikili polarize, geniş bantlı mikroşerit yama anten üzerinde çalışmışlardır. Anten, bir dikdörtgensel yamadan ve bu yamanın her bir kenarı yakınına yerleştirilmiş dört adet dikdörtgensel parazitik elemandan oluşmaktadır. Ayrıca, üretim kolaylığı için anten üzerine yerleştirilmiş bir L-probu da mevcuttur. Yapı 23 GHz-29 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Bir makalede [16] yine 5G uygulamasına yönelik, T şeklinde bir yamaya (ve yama içerisinde iki dikdörtgensel yarık) ve yama etrafına yerleştirilmiş beş adet dikdörtgensel parazitik elemana sahip bir mikroşerit yama anten sunulmuştur. Makalede dizi anten geometrisi de verilmiş ve bu dizi 25.04 GHz-30.87 GHz frekans aralığında çalışmakta olup kazancı 9.5 dBi değerindedir.

## 5.2. GNSS Antenleri

Bir araştırmada GNSS uygulamaları için [17] çok kollu ve kıvrılmış bir tel anten incelenmiştir. Anten 1.164 GHz-1.300 GHz ile 1.559 GHz-1.610 GHz frekans aralıklarında çalışmakta ve kazancı 8.66 dBi değerindedir. Bir başka araştırmada [18] L1/L2/L5 GNSS bantları için uygun, iki farklı alt taban üzerinde yerleştirilmiş iki adet oval biçiminde yamadan oluşan bir mikroşerit yama anten sunulmuştur. Yamalar üzerinde güneş ışığı şeklinde yarıklar bulunmaktadır. En yüksek kazanç 6.5 dBi değerindedir. Anten aynı zamanda 2.3 GHz WiMAX uygulaması için de kullanılabilir. Fu ve diğerleri [19] geniş bantlı, dairesel polarizasyonlu bir dipol anteni GNSS uygulamasına yönelik olarak önermişlerdir. Yapıda dört adet dipol, bıçak ucu biçimli parazitik yamalar ve empedans uyumlandırma bölümü bulunmaktadır. Anten 0.98 GHz-1.64 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Daming ve diğerleri [20] iki adet dipol, bir adet çokkenarlı yama, bir yansıtıcı ve empedans uyumlandırma kısmından oluşan bir anten üzerinde çalışmışlardır. Dairesel polarizasyonlu anten 1.1 GHz-1.7 GHz aralığında işlevseldir ve kazancı 6.37 dBi değerindedir. Guo ve diğerleri [21] ise GNSS kullanımına yönelik olarak dört kollu, düzlemsel bir Arşimed sarmal anteni empedans uyumlama kısımlarıyla birlikte tasarlamışlardır. Yapı dairesel polarizasyonlu olup 1.1 GHz-1.7 GHz aralığında çalışmaktadır ve 7.4 dBi kazanç değerine sahiptir.

## 6. SONUÇ

5G ve GNSS yapıları ayrıntılı olarak incelenmiştir. 5G kullanım senaryoları ve gereksinimleri, 5G frekans tahsisi, dünyada ve ülkemizdeki 5G denemeleri sunulmuştur. GNSS çalışma prensibi ve var olan GNSS sistemleri irdelenmiştir. Ayrıca, 5G ve GNSS' nin konumlandırma amacıyla hibrit kullanımı ile ilgili bilgi verilmiş ve bu iki sisteme ait literatürde yer alan bazı özgün anten tasarımları sunulmuştur.



## KAYNAKÇA

- [1] Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (2018). 5G ve dikey sektörler raporu, Ankara.
- [2] Shafi, M., Molisch, A. F., Smith, P. J., vd. (2017). 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35, 1201-1221.
- [3] Wilson, J. (2020). Results of the 2019 world radiocommunication conference (WRC-19), 29th World Radiocommunication Seminar, online.
- [4] Hansen, C. J. (2011). WiGiG: Multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band, *IEEE Wireless Communications*, 18, 6-7.
- [5] Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (2018). 5G ve Ötesi Beyaz Kitap, Ankara.
- [6] European Space Agency (2018), Fact Sheet, Avrupa Birliği.
- [7] Alghisi, M., Biagi, L. (2023). Positioning with GNSS and 5G: Analysis of geometric accuracy in urban scenarios, *Sensors*, 23, 1-18.
- [8] Bai, L., Sun, C., Dempster, A. G., vd. (2022). GNSS-5G hybrid positioning based on multi-rate measurements fusion and proactive measurement uncertainty prediction, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71.
- [9] Dwivedi, S., Shreevastav, R., Munier, F., vd. (2021). Positioning in 5G networks, *IEEE Communications Magazine*, 38-44.
- [10] Liu, J., Gao, K., Guo, W., vd. (2020). Role, path, and vision of ‘5G+BDS/GNSS’, *Satellite Navigation*, 1, 1-8.
- [11] Destino, G., Saloranta, J., Seco-Granados, G., vd. (2018). Performance analysis of hybrid 5G-GNSS localization, *52nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, California, ABD, 8-12.
- [12] Mahfuz, M. M. H., Islam, M. R., Habaebi, M. H., vd. (2022). A notched UWB microstrip patch antenna for 5G lower and FSS bands, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 64, 796-802.
- [13] Shamim, S. M., Dina, U.S., Arafin, N., vd. (2021). Design of efficient 37 GHz millimeter wave microstrip patch antenna for 5G mobile application, *Plasmonics*, 16, 1417-1425.
- [14] Pattanvariya, D. G., Chatterjee, A. (2021). A compact bow-tie shaped wide-band microstrip patch antenna for future 5G communication networks, *Radioengineering*, 30, 40-47.
- [15] Kim, G., Kim, A. S. (2021). Design and analysis of dual polarized broadband microstrip patch antenna for 5G mmWave antenna module on FR4 substrate, *IEEE Access*, 9, 64306-64316.
- [16] Maharjan, J., Choi, D. Y. (2020). Four-element microstrip patch array anten-

- na with corporate-series feed network for 5G communication, *International Journal of Antennas and Propagation*, 1-12.
- [17] Benmahmoud, F., Lemaitre-Auger, P., Tedjini, S. (2022). Compact wideband multi-arm 3-D wire antenna for GNSS applications, *International Journal of Electronics and Communications*, 143, 1-10.
- [18] Abdalrazik, A., Gomaa, A., Kishk, A. A. (2022). A wide axial-ratio beamwidth circularly-polarized oval patch antenna with sunlight-shaped slots for gnss and wimax applications, *Wireless Networks*, 28, 3779-3786.
- [19] Fu, S., Zhao, X., Li, C., vd. (2022). Broadband circularly polarized tapered dipole antenna for GNSS applications, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 1-7.
- [20] Daming, L., Encheng, W., Jie, W. (2022). A wideband antenna for GNSS applications with improved orthogonal dipole, *International Journal of Antennas and Propagation*, 1-6.
- [21] Guo, L., Zhang, P., Zeng, F. (2021). A novel four-arm planar spiral antenna for GNSS application, *IEEE Access*, 9, 168.

# Bölüm 3

## SİBER GÜVENLİKTE MAKİNE ÖĞRENİMİ DÖNEMİ

***Ebubekir SEYYARER<sup>1</sup>***

***Faruk AYATA<sup>2</sup>***

---

1 Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir SEYYARER, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, eseyyarer@yyu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8981-0266>.

2 Dr. Öğr. Üyesi Faruk AYATA, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Başkale MYO, farukayata@yyu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2403-3192>.

## 1. Giriş

Makine öğrenimi teknolojisinin kullanımı, karmaşık süreçlerin otomasyonunu ve büyük miktarda verinin analizini mümkün kılmaktadır. Ayrıca verilerin daha önce mümkün olmayan veya çok maliyetli olan yöntemlerle analizine izin vermektedir. Verilerin bu otomasyonu ve analizi, daha hızlı karar verme, artan verimlilik ve daha iyi müşteri deneyimi sağlamaktadır. Makine öğreniminin bu avantajları dikkate alındığında, siber güvenlik de dahil olmak üzere, neredeyse toplanan her veri parçasının makine öğrenimi algoritmaları ile işlenip analiz edilebilmesi mümkündür.

Makine öğreniminin dijital güvenliğimize hem fayda sağlama hem de zarar verme potansiyeli açıktır. Makine öğrenimi tabanlı güvenlik sistemleri, saldırıları her zamankinden daha hızlı, doğru ve verimli bir şekilde algılayabilir ve önleyebilir. Makine öğrenimi güvenlik sistemleri, çok büyük miktarda veriyi otomatik olarak analiz ederek ve geçmiş davranışlardan öğrenerek, şüpheli etkinlikleri yüksek düzeyde doğrulukla tanımlayabilir ve engelleyebilir. Öte yandan, makine öğrenimi destekli sistemler, saldırganların daha gelişmiş ve karmaşık saldırılar gerçekleştirmesini de kolaylaştırabilir. Saldırganlar, makine öğreniminin güçlü yeteneklerinden yararlanarak sistemlerde yeni güvenlik açıklarını daha kolay bulabilir, otomatik saldırılar başlatabilir ve tespitten kaçmak için gelişmiş teknikler kullanabilir.

Kuruluşların kendilerini yeterince koruyabilmeleri için makine öğrenimiyle ilişkili riskleri anlamaları önemlidir. Kuruluşlar, makine öğrenimini sorumlu bir şekilde kullandıklarından ve sistemlerini riske atmadıklarından emin olmak için en iyi uygulamaları ve politikaları geliştirmeyi de düşünmelidirler. Ayrıca, kuruluşların potansiyel saldırganların bir adım önünde olabilmeleri için makine öğrenimi alanındaki güncel eğilimler ve gelişmelerden haberdar olmak önemlidir.

Bu çalışma makine öğrenimi teknolojisinin siber güvenlik alanında yarattığı hareketliliği ve bu hareketlilik doğrultusunda bireysel, kurum ve kuruluşların bu teknolojiye bakış açılarını ortaya koymayı amaçlamaktadır.

## 2. Yapay zekâ

Algoritmalar, öğrenme, heuristikler ve analiz gibi çeşitli tekniklerin bir araya gelmesi sonucu oluşan bir disiplindir. Bu teknikler, makinelere gerçek yaşamdaki problemleri çözmek için kullanılan çoklu araçları ve yaklaşımları sağlamaktadır. Yapay zeka, insanların kullanabileceği akıllı sistemler oluşturmak için kullanılmaktadır. Yapay zeka teknolojisi, kullanıcıların robotlar, periyodik cihazlar, uzaktan kumandalı cihazlar veya diğer bilgisayar sistemleri vasıtasıyla karar verme ve karşılaşılan problemlerle

ri çözme süreçlerini içermektedir (Rammo ve Al-Hamdani, 2022; Murad ve ark., 2022). Ayrıca yapay zekanın genel amacı insan gibi düşünebilen sistemler oluşturmaktır. Amaçlanan bu sistemler eğitim, rehberlik, öğrenme vb. hizmetler ile insanların işlerini kolaylaştırmaktadır.

### 3. Makine öğrenimi

Makine öğrenimi, bilgisayarlara açıkça programlanmadan öğrenme yeteneği sağlayan bir tür yapay zekâdır. Verilere erişebilen ve bunları kendileri için öğrenmek için kullanabilen bilgisayar programlarının geliştirilmesine odaklanmaktadır. Makine öğrenimi süreci, sistemlerin verilerden öğrenebileceği, kalıpları tanımlayabileceği ve minimum insan müdahalesi ile kararlar alabileceği fikrine dayanmaktadır (Mijwil ve Shukur, 2022; Li ve ark., 2012).

Makine öğreniminin kökleri, Alan Turing ve Arthur Samuel'in bilgisayarların verilerden öğrenmesi için en eski algoritmaları geliştirdiği 1950'lerin başlarına dayanmaktadır. 1959'da Arthur Samuel, dama oynamak için kullanılan verilerden öğrenen ilk bilgisayar programını yazdı. Bu program, hatalarından ders almayı ve zamanla performansını iyileştirmeyi başardı (Skansi, 2018).

1960'larda, bilgisayarların açıkça programlanmadan verilerden öğrenmesine izin veren ilk sinir ağları geliştirildi (Keskenler, 2017). Bu, bugün hala kullanılan derin öğrenmenin başlangıcıydı.

1970'lerde, bilgisayarların verilere dayalı kararlar vermesini sağlayan ilk karar ağaçları geliştirildi. Bu, bugün hala kullanılan denetimli öğrenmenin başlangıcıydı (Lee ve Keng, 2001).

1980'lerde, bilgisayarların sorunlara çözüm geliştirmesine izin veren ilk genetik algoritmalar geliştirildi. Bu, bugün hala kullanılan evrimsel bilgi işlemin başlangıcıydı (Man, 1999).

1990'larda, bilgisayarların verileri daha doğru bir şekilde sınıflandırmasını sağlayan destek vektör makineleri geliştirildi. Bu, bugün hala kullanılan destek vektör makinelerinin başlangıcıydı (Boswell, 2002).

2000'lerde, bilgisayarların ödüllerden ve cezalardan öğrenmesine izin veren ilk pekiştirmeli öğrenme algoritmaları geliştirildi. Bu, bugün hala kullanılan pekiştirmeli öğrenmenin başlangıcıydı.

2010'larda grafik işlemciler (GPU) yaygınlaşmıştır. Büyük veri, paralel olarak işlenebilir hale gelmiştir ve bulut sistemleri bu hizmetleri hiç bir donanım yatırımı yapmadan kullanılabilir hale getirmiştir (Serengil, 2018).

Son yıllarda makine öğrenimi, tıbbi teşhis, robotik, doğal dil işleme ve bilgisayar görüşü dahil olmak üzere çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

### 3.1. Makine öğrenmesi teknikleriyle saldırı tespiti

Makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak dış kaynaklardan gelebilecek saldırılara karşı bilgisayar ağını koruyan sistemlere saldırı tespit sistemleri denilmektedir. Saldırı tespit sistemleri ağ trafiğini genellikle bağlantı noktası taramaları, hizmet reddi (DoS) saldırıları ve sistemlere yetkisiz erişim gibi kötü amaçlı ihlallere karşı izleyerek yöneticiye raporlar üretmektedir (Kaya ve Yıldız, 2014).

Literatür incelendiğinde;

- Bayes sınıflama
- Destek vektör makinesi
- Karar ağaçları
- Yapay sinir ağları saldırı tespit sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Michie ve ark., 1994; Sebastiani, 2002; Anderson ve ark., 1983; Nguyen ve Armitage, 2008).

#### a) Bayes sınıflama

Bayes teoremi, koşullu olasılığı hesaplamak için kullanılan matematiksel bir formüldür. Adını İngiliz istatistikçi Thomas Bayes'ten (1702-1761) almıştır. Teorem, başka bir B olayı verildiğinde bir A olayının koşullu olasılığının, A olayı verildiğinde B olayının olasılığının A olayının olasılığı ile çarpımı B olayının olasılığına bölünmesine eşit olduğunu belirtir. Eşitlik 1.1' de bu teoremin denklemi verilmektedir (Domingos ve Pazzani, 1997).

$$P(A/B) = \frac{P(B/A) * P(A)}{P(B)} \quad (1.1)$$

Bayes sınıflandırması, belirli bir ögenin belirli bir sınıfa ait olma olasılığını tahmin etmek için Bayes teoremini kullanan denetimli bir makine öğrenme tekniğidir. Bir olayın olasılığının, olayla ilgili olabilecek koşullara ilişkin ön bilgilere dayanarak tahmin edilebileceği fikrine dayanmaktadır. Bayes sınıflandırması, sınıflandırma görevleri için kullanılan bir tür denetimli makine öğrenimi algoritmasıdır. Bir olayın meydana gelme olasılığının, kanıt verilen olayın olasılığının olayın önceki olasılığıyla çarpımına eşit olduğunu belirten Bayes teoremine dayanır. Spam filtreleme, tıbbi teşhis, belge sınıflandırma ve yüz tanıma gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. (Kaya ve Yıldız, 2014).

Bayes sınıflandırıcıları siber güvenlik sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin, spam filtreleme, bilgi tarama, DOS, U2R ve R2L



gibi saldırılarda tercih edilen bir yöntemdir (Jemili ve ark., 2007; Farid ve Rahman, 2010; Aydın ve ark., 2018).

#### **b) Destek vektör makinesi**

Destek Vektör Makineleri (DVM), sınıflandırma ve regresyon için kullanılan bir tür denetimli makine öğrenimi algoritmasıdır. DVM'ler, karar sınırlarını tanımlayan karar düzlemleri kavramına dayanır. Karar düzlemi, farklı sınıf üyeliklerine sahip bir dizi nesneyi birbirinden ayıran düzlemdir. DVM'lerin arkasındaki ana fikir, bir veri setini sınıflara en iyi şekilde bölen maksimum marjlı bir hiper düzlem bulmaktır (Vapnik, 1998).

Saldırı tespit sistemlerinde DVM'ler etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Literatürde bu yöntemi kullanarak bilgi tarama, DOS, U2R, R2L saldırılarında ve normal davranışları ayırt etmede yüksek başarı elde eden birçok çalışma yapılmaktadır (Zhang ve Zhu, 2010; Wang ve ark., 2010; Mu ve ark., 2012; Arslan, 2021).

#### **c) Karar ağaçları**

Karar ağaçları, sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılan bir tür denetimli makine öğrenimi algoritmasıdır. Verilerden karar kural- larını öğrenerek belirli koşullara dayalı tahminler yapan bir tür tahmin modelidir. Karar ağaçları, belirli koşullara dayalı bir kararın olası sonuç- larının bir modelini oluşturmak için kullanılır. Hem sınıflandırma hem de regresyon problemleri için güçlü bir araçtır (Witten ve Frank, 2011).

Karar ağacı modeli, verileri farklı kategorilere ayırmak için kullanı- ılır. Her düğümün bir karar veya veri özelliğini temsil ettiği ağaç benzeri bir yapı oluşturarak çalışmaktadır. Ağacın dalları, kararın veya özelliğin olası sonuçlarını temsil eder. Ağacın yaprakları, verilerin nihai sınıflan- dırmasını temsil eder (Han ve Kamber, 2000).

Literatür incelendiğinde siber güvenlik sistemlerinde kullanılan karar ağaçları sıklıkla davranış ayırt etme, bilgi tarama ve DOS saldırılarının sınıflandırılmasında kullanılmaktadır (Bahrololum ve ark., 2009; Alazab ve ark., 2012; Sharma ve Nema, 2013; Doğan ve ark., 2019).

#### **d) Yapay sinir ağları**

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin yapısından sonra modellen- nen bir tür makine öğrenimi algoritmasıdır. Bilgileri işleyen ve sinyalleri bir nörondan diğerine ileten birbirine bağlı nöronlardan (veya düğümler- den) oluşurlar. YSA'lar, örüntü tanıma, sınıflandırma ve tahmin dahil ol- mak üzere çeşitli görevler için kullanılır. Geleneksel algoritmalar için çok zor olan karmaşık problemleri çözmek için kullanılabilirler (Öztürk ve Şahin, 2018).

Yapay sinir ağları sıklıkla aşağıda belirtilen alanlarda kullanılmaktadır:

- Tahmin
- Veri filtreleme
- Sınıflandırma
- Veri yorumlama
- Veri ilişkilendirme

Literatür tarandığının diğer yöntemlere nazaran YSA'ların kullanıldığı siber güvenlik sistemlerinin daha başarılı sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir. Normal davranış sınıflandırmasında, bilgi tarama, DOS ve R2L saldırı tespitlerinde yüksek %100 yakın başarı elde etmişlerdir (Liu ve ark., 2007; Gong ve Guan, 2012; Boyacı ve ark., 2016; Aytan ve Barışçı, 2018).

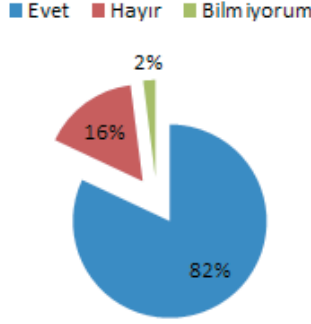
### 3.2. Makine öğreniminin saldırı tespit sistemlerine etkisi

Makine öğreniminin saldırı tespit sistemleri üzerindeki olumlu etkisi kaçınılmazdır. Saldırı tespit sistemleri makine öğrenimi algoritmalarından yararlanarak büyük miktarda veriyi geleneksel yöntemlerden çok daha hızlı ve doğru şekilde analiz edebilmektedir. Ayrıca güvenlik analitiğinin doğruluğunu artırmak için kullanılabilir ve güvenlik ekiplerinin tehditleri daha iyi tanımlamasına ve bunlara yanıt vermesine olanak tanır.

Şirketler, makine öğrenimini ve siber güvenliği müşterilerinin güvenliğini sağlamak için ele alınması gereken en önemli iki teknoloji olarak görmektedir. Şirketler yeni teknolojileri aktif olarak araştırarak müşterilerini siber güvenlik tehditlerine karşı korumayı ve siber güvenliğin önemi konusunda eğitmeye ve onlara kendilerini korumaları için ihtiyaç duydukları araç ve kaynakları sağlamayı amaçlamaktadır.

Öncülüğünü, ESET adına OnePoll'un yaptığı, Katılımcılarının; ABD, İngiltere ve Almanya'da yer alan 50'nin üzerinde çalışana sahip çeşitli şirketlerden 900 bilişim teknolojileri yönetici olan bir araştırmaya ait verilere göre;

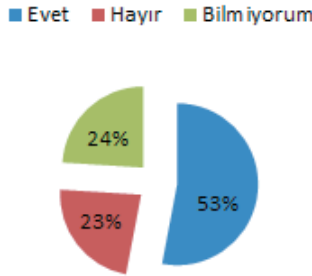
### Siz/kuruluşunuz makine öğrenimi kullanan bir siber güvenlik ürünü uyguladınız mı?



**Şekil 1.** Katılımcılardan şirketlerinde makine öğrenimi tabanlı bir siber güvenlik çözümü kullananların yüzdesi.

Şekil 1’de görüldüğü üzere katılımcıların %82’si, şirketlerinin makine öğrenmesi kullanan bir siber güvenlik ürününe sahip olduğunu, %16’sı böyle bir ürünü kullanmadığını ve %2’si de bilgi sahibi olmadığını belirtmektedir.

### Kuruluşunuzun önümüzdeki 3-5 yıl içinde siber güvenlik stratejisinde makine öğrenimini kullanma planları var mı?

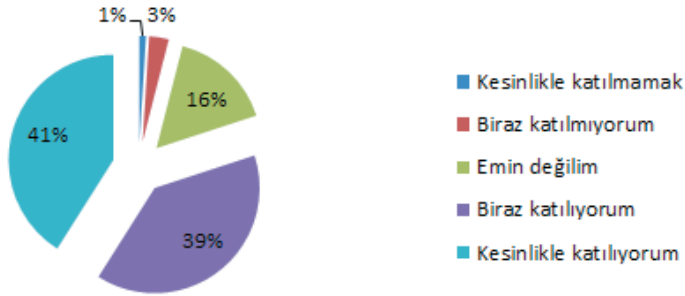


**Şekil 2.** Katılımcılardan şirketlerinde 3 ila 5 yıl içerisinde makine öğrenimi kullanan bir siber güvenlik ürününe geçiş yapmayı planlama yüzdesi.

Şirketlerinde henüz böyle bir teknolojiyi kullanmayanlardan %53’ünün yakın gelecekte makine öğrenimi kullanan bir siber güvenlik

ürününe geçiş yapmayı planladığını ve %23'ünün ise böyle çözümün yakın zamanda kullanmayı düşünmediklerini belirtmektedir (Şekil 2).

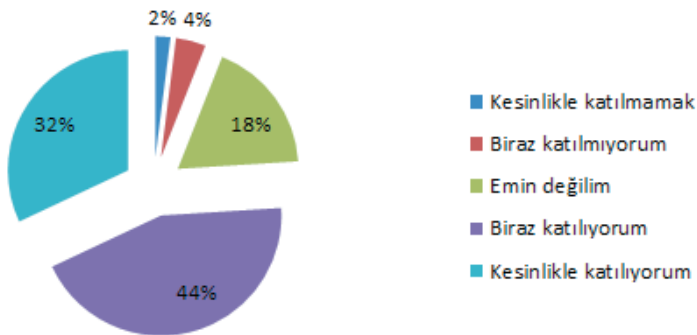
**Makine öğrenimi, kuruluşunun tehditleri daha hızlı algılamasına ve bunlara yanıt vermesine yardımcı olacak/yardımcı oluyor**



**Şekil 3.** Makine öğrenmesinin tehditleri daha hızlı tespit edip onlara karşı daha hızlı tepki vermelerini sağladığını/sağlayacağını düşünen katılımcıların yüzdesi.

Katılımcıların %80'ni makine öğrenimi kullanan bir siber güvenlik ürününün tehditleri daha hızlı tespit ederek tepki vermelerine yardımcı olduğuna ya da olacağına inanıyor (Şekil 3).

**Makine öğrenimi, kuruluşunun siber beceri eksikliğini çözmeye yardımcı olacak/yardımcı oluyor**

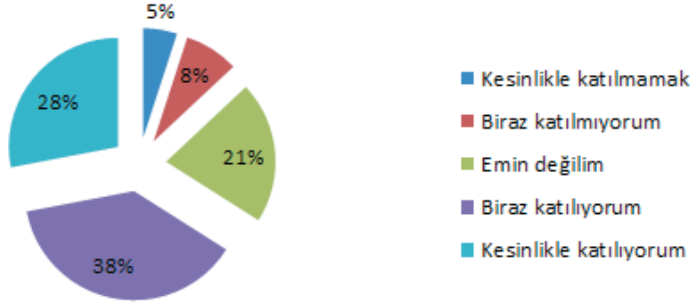


**Şekil 4.** Makine öğrenmesinin siber güvenlik becerisi açığını kapadığını/kapayacağını düşünen katılımcıların yüzdesi.

Şekil 4'te görüldüğü gibi katılımcıların %76'sı, bu teknolojilerin şirketlerindeki siber güvenlik becerisi açığını kapamaya yardımcı olacağına inanmaktadır. %2'si bu teknolojinin şirketlerine bir katkı sağlamayacağı düşüncesindedir.

Makine öğrenimi algoritmaları güvenlikçiler için büyük bir potansiyele sahip olsa da siber suçlular için de bu teknoloji aynı potansiyele sahiptir. Çünkü saldırganların daha gelişmiş ve karmaşık saldırılar gerçekleştirmesini de kolaylaştırabilir. Saldırganlar, makine öğreniminin güçlü yeteneklerinden yararlanarak sistemlerde yeni güvenlik açıklarını daha kolay bulabilir ve otomatik saldırılar başlatabilir.

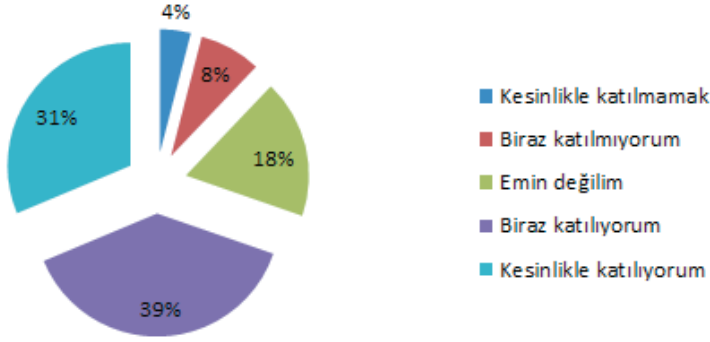
**Makine öğrenmesi, kuruluşumun algılaması ve yanıt vermesi gereken saldırıların sayısını artıracak/artıracak**



**Şekil 5.** Makine öğrenmesi uygulamalarının kuruluşlarındaki saldırı sayısını artıracığını düşünenlerin yüzdesi

Katılımcıların %66'sı makine öğrenmesi teknolojisinin güvenlik sistemlerinde kullanılmasının siber saldırı sayısını arttıracığı düşüncesinde ve %34'lük kısmı ise emin olmamakla birlikte bu teknolojinin siber saldırıları arttırmayacağı kanaatindedir (Şekil 5).

### Makine öğrenmesi, tehditleri daha karmaşık hale getirecek



**Şekil 6.** Makine öğrenmesi algoritmaları tehditlerin daha karmaşık hale geleceğini düşünen katılımcıların yüzdesi

Şekil 6'da görüldüğü üzere katılımcıların %70'i makine öğrenmesi algoritmalarının siber saldırılarda kullanılmasıyla saldırıların daha karmaşık bir hal alacağı görüşündedir. Katılımcıların %12'si ise bu teknolojinin saldırılarda kullanılmasının herhangi bir karmaşıklık yaratmayacağını belirtmektedir.

#### 4. Sonuç

Makine öğrenimi algoritmaları, yeni ve bilinmeyen tehditleri tanıma ve doğru şekilde tespit etme noktasında zorluklar yaşayabilmektedir. Saldırganların bu yeni teknolojiyi kendi çıkarları doğrultusunda kullanmalarında ise risk katlanarak artmaktadır. Bu nedenle, makine öğrenimini güvenlik duvarları, kötü amaçlı yazılımdan koruma uygulamaları, izinsiz giriş tespit sistemleri ve insan uzmanlığı gibi diğer güvenlik teknolojileriyle desteklemek önemlidir. Yani kurumsal siber güvenlikte benimsenmesi gereken daha güvenli ve dengeli bir yaklaşımdır. Makine öğreniminin gücünü ve potansiyelini kullanabilen, ancak diğer algılama ve önleme teknolojilerini ve insan uzmanlığını da destekleyen çok katmanlı bir çözüm kullanılmalıdır.

Sonuç olarak, makine öğrenimi teknolojiyle etkileşim biçimimizde devrim yaratma potansiyeline sahipken, bazı ciddi güvenlik risklerini de beraberinde getiriyor. Saldırganlar bu teknolojiyi kendi çıkarları için kullanmaktadır ve yeni kötü amaçlı yazılım türlerinin ortaya çıkması giderek artan bir endişe kaynağı olmaktadır. Kuruluşlar, personelinin siber güvenlik konusunda eğitmek ve güvenli makine öğrenimi çözümleri kullanmak gibi yeni adımlar atmalıdırlar.

## KAYNAKÇA

- Alazab, A., Hobbs, M., Abawajy, J. ve Alazab, M., (2012). Using Feature Selection for Intrusion Detection System, International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT).
- Anderson, J., Michalski, R. ve Mitchell, T., (1983). Machine learning: An artificial intelligence approach, M. Kaufmann.
- Arslan, R. S. (2021). Kötücül Web Sayfalarının Tespitinde Doc2Vec Modeli ve Makine Öğrenmesi Yaklaşımı, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (27), 792-801. DOI: 10.31590/ejosat.981450.
- Aydın, A. , Doğru, İ. A. ve Dörterler, M., (2018). Makine Öğrenmesi Algoritmalarıyla Android Kötücül Yazılım Uygulamalarının Tespiti, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22 (2), 1087-1094.
- Aytan, B. ve Barışçı, N., (2018). Siber Savunma Alanında Yapay Zeka Tabanlı Saldırı Tespiti ve Analizi, 2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies.
- Bahrololum, M., Salahi, E. ve Khalegni, M., (2009). Machine Learning Techniques for feature Reduction in Intrusion Detection Systems: A Comparison, Fourth International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology.
- Boswell, D., (2002). Introduction to Support Vector Machines.
- Boyacı, M., Benzer, R. ve Cıylan, B., (2016). Siber Güvenlik Ve Yapay Sinir Ağları Yaklaşımıyla Bir Değerlendirme, 3rd International Management Information Systems Conference, İzmir, Türkiye.
- Çalış, K., Gazdağı O. ve Yıldız, O., (2013), Reklam İçerikli Epostaların Metin Madenciliği Yöntemleri ile Otomatik Tespiti, Bilişim Teknolojileri Dergisi, cilt 6, no: 1.
- Doğan, R., Güven, E.Y. ve Aydın, M.A, (2019). Makine Öğrenmesi ile İşletim Sistemi Tarama Saldırısı Tespiti, Proceedings of the International Conference on All Aspects of Cyber Security 2019 (A2CS'19)
- Domingos, P. ve Pazani, M. (1997). On the Optimality of the Simple Bayesian Classifier under Zero-One Loss, Springe.
- Farid, D. ve Rahman, M., (2010). Anomaly Network Intrusion Detection Based on Improved Self Adaptive Bayesian Algorithm, Journal of computers, cilt 5, no. 1, pp. 23-31.
- Gong, X. ve Guan, X., (2012). Intrusion Detection Model Based on the Improved Neural Network and Expert System, IEEE Symposium on Electrical & Electronics Engineering (EESYM).
- Han, J. ve Kamber, M. (2000). Data Mining Concepts and Techniques, Morgan Kaufmann Publishers, 1st Ed., San Francisco, USA.
- Jemili, F., Zaghdoud, M. ve Ahmed, M., (2007). A Framework for an Adaptive



Intrusion Detection System using Bayesian Network, IEEE Intelligent and Security Informatics.

Kaya, Ç., ve Yıldız, O. (2014). Makine öğrenmesi teknikleriyle saldırı tespiti: Karşılaştırmalı analiz, Marmara University Journal of Science, 26(3), 108. doi:10.7240/mufbed.24684.

Keskenler, M.F. ve Keskenler, E.F. (2017). Geçmişten Günümüze Yapay Sinir Ağları ve Tarihçesi, Takvim-i Vekayi, 5 (2), 8-18. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/takvim/issue/33375/346279>.

Lee, S. J. ve Keng, S. (2001). A Review Of Data Mining Techniques, Industrial Management & Data Systems 1(101), s. 41-46.

Li Y., Xia J., Zhang S., Yan J., Ai X., ve Dai K., (2012). An efficient intrusion detection system based on support vector machines and gradually feature removal method, Expert Systems with Applications, vol.39, no.1, pp:424-430.

Liu, G., Yi, Z. ve Yang, S., (2012). A Hierarchical Intrusion Detection Model Based on the PCA Neural Networks, Neurocomputing, cilt 70, pp. 1561-1568.

Man, K.F., Tang, K.S. ve Kwong, S., (1999). Genetic Algorithms, Springer Publishing.

Michie, D., Spiegelhalter, D. ve Taylor, C., (1994). Machine Learning Neural and Statistical Classification, New York: Ellis Horwood Limited.

Mijwil, M. M., ve Shukur B. S., (2022). A Scoping Review of Machine Learning Techniques and Their Utilisation in Predicting Heart Diseases, Ibn AL-Haitham Journal For Pure and Applied Sciences, vol. 35, no.3, pp: 175-189. <https://doi.org/10.30526/35.3.2813>

Mu, Q., Chen, Y. ve Zhang, Y., (2012). Incremental SVM Algorithm to Intrusion Detection Base on Boundary Areas, International Conference on Systems and Informatics.

Murad N. M., Rejeb L., ve Said L. B., (2022). The Use of DCNN for Road Path Detection and Segmentation, Iraqi Journal For Computer Science and Mathematics, vol. 3, no. 2, pp: 119-127. <https://doi.org/10.52866/ij-csm.2022.02.01.013>

Nguyen, T. ve Armitage, G., (2008). A Survey of Techniques for Internet Traffic Classification Using Machine Learning, IEEE Communications Surveys and Tutorials, cilt 10, no. 4, pp. 56-76.

Öztürk, K., ve Şahin, M. E., (2018). Yapay Sinir Ağları ve Yapay Zekâ'ya Genel Bir Bakış. Takvim-i Vekayi, vol.6, no.2, 25-36.

Rammo F. M. ve Al-Hamdani M. N., (2022). Detecting The Speaker Language Using CNN Deep Learning Algorithm, Iraqi Journal For Computer Science and Mathematics, vol. 3, no. 1, pp: 43-52, January 2022. <https://doi.org/10.52866/ijcsm.2022.01.01.005>

Sebastiani, F., (2002). Machine Learning in Automated Text Categorization,

ACM Computing Surveys (CSUR), cilt 34, no. 1, pp. 1-47.

Serengil, Ş. (2018). Yapay Zekanın Kısa Bir Tarihçesi, <https://bilisim.io/2017/11/17/yapay-zekanin-kisa-bir-tarihcesi/>. E.T.:19.12.20222.

Sharma, V. ve Nema, A., (2013). Innovative Genetic approach For Intrusion Detection by Using Decision Tree, International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT).

Skansi, S. (2018). Introduction to Deep Learning: From logical calculus to artificial intelligence, Switzerland: Springer.

Vapnik, V., (1998). Statistical Learning Theory, New York: John Wiley.

Wang, J., Li, T. ve Ren, R., (2010). A Real Time IDSs Based on Artificial Bee Colony Support Vector Machine Algorithm, Third International Workshop on Advanced Computational Intelligence.

Witten, I. ve Frank, E., (2011). Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (Third Edition), Morgan Kaufmann Publication.

Zhang, Y. ve Zhu, Y., (2010). Application of Improved Support Vector Machines in Intrusion Detection, 2nd International Conference on e-Business and Information System Security.



# Bölüm 4

## PEYNİR ALTI SUYUNUN KESİKLİ BİYOREAKTÖRDE ARITIMI

*Nesrin DURSUN<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Ardahan Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İnşaat Bölümü, Ardahan, Türkiye. nesrindursun@ardahan.edu.tr

ORCID: 0000-0002-7463-1038

## GİRİŞ

Dünya; hızlı nüfus artışı, sanayileşme, gıda üretim uygulamaları, artan yaşam standartları ve yetersiz su kullanım stratejilerinin neden olduğu su kalitesi ve küresel ısınma açısından, çevresel krizle karşı karşıyadır. Hızlı sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışı, arıtılmamış evsel-endüstriyel atık suların nehirlerle ve kanallara fazla miktarlarda deşarj edilmesi-ne, dolayısıyla yüzey ve yeraltı su kalitesinde antropojenik bozulmalara neden olmuştur. Kirlı su kalitesi, yeraltı sularını etkileyerek kentsel ve kırsal bölge sakinlerinin içme suyu güvenliğini tehdit etmekte, özellikle de su yaşamı ve biyosfer üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Atık su yönetiminin eksikliği, sucul ekosistemlerin biyolojik çeşitliliği üzerinde doğrudan etkiye sahip olup, kentsel gelişimden gıda üretimi ve sanayiye kadar çeşitli sektörlerin bağılı olduğu yaşam destek sistemlerinin temel bütünlüğünü bozmaktadır. Atık su yönetimi; sektörler, tatlı su ve denizcilik alanlarında faaliyet gösteren ekosistem tabanlı yönetimin bir parçası olarak düşünülmelidir. Çevresel kirleticileri ve sağıık tehlikelerini en aza indirmek, kirleticilerin arıtılarak alıcı ortamlara güvenli bir şekilde verilmesi için, izin verilen sınır değerlere indirilmesi gerekmektedir (Latif ve diğlerleri, 2011). Bu kapsamda süt endüstrisi ve peynir işletmelerinde oluşan atıksular, en önemli endüstriyel kirleticileri temsil etmektedir. Dünyada, peynir altı suyu üretiminin yılda 160 milyon ton üzerinde olduğu tahmin edilmektedir. Bu toplam peynir altı suyu üretiminin yaklaşık yarısı, önemli miktarda kaynak kaybına ve büyük bir kirlilik sorununu temsil ederek doğrudan çevreye deşarj edilmektedir. 1 kg peyniri yapmak için 9 kg peynir altı suyu üretilmektedir (Chatzipaschali ve Stamatis, 2012).

Peynir altı suyu, peynir suyunun suda çözünebilir bileşenlerinin çoğunu ve sütte bulunan suyu içeren peynir üretim sürecinin sıvı yan ürünüdür. Daha spesifik olarak, peynir yapımı sırasında süt kazeininin çökmesini ve uzaklaştırılmasını takiben kalan sıvı, peynir altı suyu olarak elde edilmektedir. Kullanılan sütün kalitesine ve türüne bağılı olarak sarı/yeşil renge, bazen mavimsi bir renk tonuna sahiptir. Peynir altı suyunun içeriğı değerlendirilen sütün kalitesi ve bileşimi, kullanılan peynir üretim teknikleri, maya miktarı, pıhtılaşma için kullanılan asit, pıhtılaşma süresi ve sıcaklığa bağılıdır. Peynir altı suyu, işlenen süt hacminin %85-95'ini temsil etmekte ve süt besinlerinin %55'ini yapısında bulundurmaktadır. Süt besinleri arasında en fazla bulunanlar; laktoz (ağırlık/hacim %4.5-5), çözünür proteinler (ağırlık/hacim %0.6-0.8), lipitler (ağırlık/hacim %0.4-0.5) ve mineral tuzları (%8-10 kurutulmuş ekstrakt) olarak sıralanabilir. Peynir altı suyu peynir tuzları NaCl ve KCl (%50'den fazla), kalsiyum tuzları (en fazla fosfat), protein olmayan azot bileşikleri (üre ve ürik asit), B grubu vitaminleri, laktik (ağırlık/hacim %0.05) ve sitrik asit gibi bileşenlerden oluşmaktadır (Chatzipaschali ve Stamatis, 2012; Siso, 1996).

Peynir altı suyunun %99'a yakın yüksek biyobozunurluğu, ~70 g KOI L<sup>-1</sup> konsantrasyonu ve düşük bikarbonat alkalitesi (~50 meq.L<sup>-1</sup>) nedeniyle peynir altı suyu anaerobik çürütücülerde yüksek organik yükleme oranlarında işletimi zor olan substratlardan biridir (Malaspina ve diğerleri, 1996). Anaerobik arıtmanın başarılı olabilmesi için proses konfigürasyonu, sıcaklık, biyokütle, pH, besin maddesi ve substrat gibi parametrelerin dikkatle incelenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, birçok proses konfigürasyonu araştırılmıştır. Anaerobik fermentasyon verimliliği, biyoreaktör tasarım modifikasyonu veya ileri çalışma teknikleri ile sağlanabilir. Anaerobik fermentasyon işlemi iki aşamaya ayrılabilir. Birinci veya asit fermentasyonu fazı, uçucu organik asitlerin baskın olduğu ara ürünlerin üretiminden oluşur. İkinci veya metan fermentasyonu fazı ise, bu ara ürünlerin başta metan ve karbon dioksit olmak üzere, kararlı nihai ürünlere dönüştürülmesiyle oluşmaktadır. Klasik anaerobik fermentasyon, hem asidojeniz hem de metanojeniz fazın meydana geldiği tek bir reaktörde gerçekleştirilmektedir. Anaerobik fermentasyon, sıcaklık değişiminden hızlı bir şekilde etkilenmektedir. Psikrofilik (0-20 °C), mezofilik (20-42 °C) ve termofilik (42-75 °C) sıcaklıklara göre gruplandırılabilir. Anaerobik bakteriler, sıcaklık değişikliklerine iyi direnç göstermektedir. Mezofilik aralıkta, bakteriyel aktivite ve büyüme her 10 °C azalma için %50 azalmaktadır. Böylece, belirli bozunma derecesi için, sıcaklık ne kadar düşük olursa, bozunma süresi de o kadar uzun olmaktadır. Metanojeniz fazda mikroorganizmalar sıcaklık değişimine karşı çok hassastır. Sıcaklığın asidojeniz faz üzerine etkisi, metanojeniz faza göre çok hassas değildir. Bunun nedeni, karışık mikroorganizma popülasyonunda her zaman optimum için ilgili aralıkta olan bazı bakterilerin varlığıdır (Ke ve diğerleri, 2005).

Peynir altı suları fizikokimyasal ve biyolojik yöntemlerle arıtılmaktadır. Fizikokimyasal yöntemlerde reaktiflerin maliyetli, çözünmüş KOI uzaklaştırılmasının düşük verimde olması nedeniyle biyolojik prosesler genellikle tercih edilmektedir. Biyolojik proseslerden anaerobik fermentasyon, yüksek organik içerikli atıksular için en uygun prosestir. Bu proseslerin diğer proseslere göre önemli avantajları; (i) düşük maliyet, (ii) yüksek enerji verimliliği, (iii) işletim kolaylığı olarak sıralanabilir (Chatzipaschali ve Stamatis, 2012). Anaerobik prosesler temiz, sürdürülebilir, ucuz ve bakteri kontaminasyon riskini elimine eden proseslerdir. Ayrıca, yüksek organik içerikli atıksuların kullanımı nedeniyle avantajlıdır. Bu kapsamda literatürde araştırma yapılarak, peynir altı suyunun biyoreaktörlerde arıtımı üzerine araştırmalara erişilmiştir. Bu araştırmalarda, peynir altı suyunun arıtımı, farklı araştırma (biyohidrojen, biyometan üretimi gibi) amaçları ile birlikte çeşitli biyoreaktör tiplerinde incelenmiştir. Bu araştırmaların bazıları aşağıda verilmiştir.

Cruz-Salomón ve diğerleri (2017), üç tip atıksu (peynir altı suyu, şilempe ve kahve işleme atık suyu) arıtımını araştırmak amacıyla, mezofilik koşullarda 60 gün boyunca işletilen, üç laboratuvar ölçekli anaerobik genişletilmiş granüler çamur yatağı (EGSB) biyoreaktörü kullanmıştır. 6 gün hidrolik bekleme süresinde peynir altı suyu, şilempe ve kahve işleme atık suyunun KOI giderim verimi sırasıyla %91, %74 ve %96 olarak belirlenmiş olup, ortalama metan üretimi ise 340, 245 ve 300 mL/g KOI gün olarak tespit edilmiştir.

Peynir altı suyu arıtılabilirliğinin Ergüder ve diğerleri (2001) tarafından incelendiği bir araştırmada da, tek ve iki kademeli yukarı akışlı çamur yataklı reaktörlerde, dolgu malzemesi olarak granüler çamur kullanılarak, iz element ilavesi ile peynir altı suyunun anaerobik olarak arıtılabilirliği ve metan üretim potansiyeli çalışılmıştır. KOI giriş (peynir altı suyu pH'ı 3.92) konsantrasyonu 42.7-55.1 g/L, hidrolik bekleme süreleri 2-3 gün aralığında uygulanarak, %95-97 oranında KOI giderimi belirlenmiştir. Ayrıca, %72-82 oranında biyogaz (424 mL CH<sub>4</sub>/gKOI) saptanmıştır. Başka araştırmada da, Ottaviano ve diğerleri (2017), peynir altı suyunu, farklı hidrolik bekleme sürelerinde termofilik koşullarda (55 °C) işletilen, anaerobik akışkan yataklı bir reaktörde (AFBR) araştırmıştır. AFBR1'de 4900±200 mg laktoz/L sabit konsantrasyonda 8, 6, 4, 2, 1 ve 0.5 saat hidrolik bekleme süreleri ve AFBR2'de ise 6 saat sabit hidrolik bekleme süresinde, 2800±100, 4900±200, 6800±300, 9800±300 ve 14600±300 mg laktoz/L peynir altı suyu konsantrasyonlarında çalışmıştır. AFBR1'de 0.5 saat hidrolik bekleme süresinde elde edilen maksimum hidrojen üretim oranı 4.1±0.2 L H<sub>2</sub>/saat L ve AFBR2'de 6800±300 mg laktoz/L peynir altı suyu konsantrasyonunda maksimum hidrojen üretim oranı 0.85±0.12 L H<sub>2</sub>/saat L olarak belirlenmiştir.

Gannoun ve diğerleri (2008) ise, peynir altı suyunu yukarı akışlı anaerobik filtre sisteminde araştırmıştır. Reaktör sistemi beslenmeden önce, inhibisyon problemlerini çözmek ve reaktördeki tıkanma problemini önlemek için, ön arıtma işlemi uygulanarak reaktör beslenmiştir. Ön arıtma işlemi uygulanmış peynir altı suyunun, organik yükleme oranı (OLR) ve hidrolik bekletme süresi üzerindeki etkileri incelenmiş ve KOI giderim verimi %80-90 olarak belirlenmiştir. Araştırma sürecinde 20 g/L KOI konsantrasyonu, 4 g KOI/L gün organik yükleme oranında, KOI veriminin %72'ye düştüğü bildirilmiştir. Hidrolik bekletme süresinin 2 gün olarak işletildiği proseste, metan veriminin 280 L/kgKOI olduğu tespit edilmiştir.

Rodgers ve diğerleri (2004) tarafından ise, peynir altı suyunu arıtmak için hareketli anaerobik biyofilm reaktör kullanılmıştır. Bu proseste biyofilm'in, sıvı içinde dikey olarak yukarı ve aşağı hareket ettirilen plastik biyofilm ortam modülü üzerinde büyümesi hedeflenerek, karıştırmanın performans üzerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Reaktör,



mezofilik koşullarda ( $35 \pm 2$  °C) ve hidrolik bekletme süresi 1 gün olarak işletilmiş olup,  $11.6 \text{ kg KOI m}^{-3}\text{gün}^{-1}$  yükleme oranında, %89 giderim verimi tespit edilmiştir. Hidrolik bekletme süresi 0.6 gün'de işletildiğinde  $15.2 \text{ kg KOI m}^{-3}\text{gün}^{-1}$  yükleme oranında, giderim veriminin %81'e düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca, proseste üretilen biyogaz verimi %63 olarak bildirilmiştir. Tehranı ve diğerleri (2015) de, pilot ölçekli hibrit anaerobik biyoreaktörde, peynir altı suyu arıtımını araştırmıştır. Hibrit biyoreaktörde, sıcaklık ve hidrolik bekleme süresi gibi çalışma parametrelerinin kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi ve biyogaz üretimi üzerindeki etkilerini incelemiştir. KOI giderimi iki farklı sıcaklıkta (24 ve 40 °C) araştırılmış olup, 48 saat hidrolik bekleme süresi,  $25.85 \text{ g KOI/Lgün}$  organik yükleme oranı ve 40 °C sabit sıcaklıkta maksimum KOI giderimi %80 olarak tespit edilmiştir.

Shilton ve diğerleri (2013) de, peynir altı suyunu  $2.4 \text{ kg KOI/m}^3$  gün organik yükleme oranı ve 20 günlük hidrolik bekleme süresinde (HBS) işletilen tam ölçekli birincil çamur çürütücüye benzeyen tezgah üstü reaktörde araştırmıştır. Peynir altı suyunun birincil çamur ile beraber biyolojik parçalanması,  $3.2 \text{ kg KOI/m}^3\text{gün}$  (17 gün HBS) organik yükleme oranında, gaz üretimi için yalnızca birincil çamur parçalanmasına kıyasla %151'e çıkmış olarak belirlenmiştir. Kimyasal alkalinite ilavesi yapıldığında ise, peynir altı suyunun birincil çamur ile birlikte  $6.4 \text{ kg KOI/m}^3\text{gün}$  (11 gün HBS) organik yükleme hızında parçalanmasıyla, gaz üretimi %208'e yükselmiştir. Ayrıca, kimyasal ilavesi ile hayvan gübresi değiştirildiğinde,  $5.2\text{-}6.9 \text{ kg KOI/m}^3\text{gün}$  (11-14 gün HBS) organik yükleme oranında, gaz üretimi %268 olarak belirlenmiştir.

Kesikli biyoreaktörlerde, peynir altı suyunun farklı amaçlarla incelenmesi kapsamında sınırlı çalışma mevcuttur. Bu kapsamda Mockaitis ve diğerleri (2006), granüler biyokütle içeren mekanik olarak karıştırılan anaerobik ardışık kesikli reaktörde, peynir altı suyu arıtımına yönelik artan organik yükleme ve azalan etkili alkalinite takviyesinin (sodyum bikarbonat olarak) etkisini araştırmıştır. Reaktörde,  $0.6\text{-}4.8 \text{ mg KOI/Lgün}$  organik yüklemelere karşılık gelen 500, 1000, 2000 ve 4000 mg/L'lik etkili KOI konsantrasyonlarında, 8 saatlik döngülerde çalışılmıştır. Filtrelenmiş numunelerin KOI verimi %90'ın üzerinde belirlenmiştir. Bu sonuçlar, 500 ve 1000 mg KOI/L'de işletilen kesikli reaktörlerde %50 ( $\text{NaHCO}_3$  eklemesiyle mg  $\text{NaHCO}_3$ /mg KOI kütlesi arasındaki oran), 2000 ve 4000 mg KOI/L'de işletilen kesikli reaktörlerde %25 oranında optimize edilmiş alkalinite takviyesine bağlı olarak elde edilmiştir. Başka bir çalışmada da Lagoa-Costa ve diğerleri (2020) tarafından, peynir altı suyundan uçucu yağ asitleri üretiminin optimizasyonunun araştırıldığı bir anaerobik ardışık kesikli reaktörde hidrolik bekleme sürelerinin değişimi incelenmiştir. Asitlenme derecesi, katı bekleme süresi 5 günden 15 güne çıkarıldığında

0.73'ten 0.83'e yükselmiştir. Çalışmada, hidrolik bekleme süresi (HRT) 3 günden 1 güne düşürüldüğünde ise 0.79'dan 0.83'e yükselmiştir. Dolayısıyla, HRT'nin kısa tutulmasının işlem etkinliğini arttırdığı rapor edilmiştir.

Sivakumar ve diğerleri (2012) de, oda koşullarında işletilen laboratuvar ölçekli anaerobik kesikli reaktörde, süt işleme endüstrisi atıksularını araştırmıştır. Reaktörde farklı pH, aşı mikroorganizma miktarı ve organik yükleme oranları incelenmiştir. Proses 100 L hacminde ve 30 gün boyunca sürekli olarak izlenmiştir. KOI giderim verimi %92.80 olarak belirlenmiş ve 1 kg KOI parçalanmasıyla 0.311 m<sup>3</sup> hacminde biyogaz üretilmiştir. Biyogazın maksimum %69.18 metan içerikli olduğu tespit edilmiştir. Abu-Reesh (2014) tarafından yapılmış çalışmada da, peynir altı suyunun anaerobik arıtımında metanojenlerin aktivitesini engelleyen uçucu yağ asitleri birikmesi nedeniyle pH'nın önemli ölçüde düştüğü, bunun da düşük gaz verimine ve biyogazın düşük metan içeriğine neden olduğu rapor edilmiştir. 36 °C'de, pH 6.5'de 28 günlük kesikli çalışmada, 18000 mg/L'lik başlangıç KOI'sinde %84'lük KOI giderim verimliliğine ulaşılmıştır. 100 L kesikli reaktörde, biyogaz üretimi 20 L olarak saptanmıştır. 8000 mg/L KOI'lik seyreltilmiş peynir altı suyunun, 10 günlük bir bekleme süresinde %100'e yakın KOI giderimi sağladığı ve yaklaşık 20 L biyogaz ürettiği belirlenmiştir.

Fernández ve diğerleri (2015) tarafından yapılmış çalışmada da, peynir altı suyu, anaerobik olarak termofilik koşullarda ardışık kesikli reaktörde tek ve iki aşamalı bir konfigürasyon (H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>) kullanılarak değerlendirilmiştir. Tek aşamalı proses, 8.3 gün hidrolik bekletme süresinde 314.5 ± 6.6 L CH<sub>4</sub>kg<sup>-1</sup>KOI<sub>besin</sub> spesifik metan üretimi ile istikrarlı bir performans göstermiştir. İki aşamalı proste ise, daha erken bir aşamada metanojen fazda asit birikimi gözlenmiş ve 12.5 günlük bir HRT'de istikrarsızlık saptanmıştır. Bu durum, hidrojen üretim aşamasında pH kontrolünün bir sonucu olarak yüksek konsantrasyonlarda sodyum ve potasyum iyonları tarafından proses inhibisyonunun göstergesi olarak belirtilmiştir. Buna rağmen, 340.4 ± 40 L CH<sub>4</sub>kg<sup>-1</sup>KOI<sub>besin</sub> maksimum spesifik metan üretimi ile sonuçlandığı bildirilmiştir.

Araştırmalar, peynir altı suyu üzerine çalışmaların mevcut olduğunu, kesikli biyoreaktörün kullanıldığı çalışmaların sınırlı olduğunu göstermiştir. Bu kapsamda, literatüre göre Ardahan kaşar peyniri peynir altı suyunun, anaerobik arıtımı ile ilgili kesikli biyoreaktörün kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmada, Ardahan (merkez ve ilçesi Göle)'da kaşar peyniri üretimi yapan firmaların fazla miktarda peynir altı suyu elde ediyor oldukları ve bu suyu herhangi bir geri kazanım yada arıtma yapmadan alıcı ortama deşarj ettikleri göz önünde bulundurulurken, bu firmaların gelecekte kurmak isteyebileceği pilot ölçekli tesis-

lere yol haritası olması bakımından, peynir altı suyunun temin edilerek laboratuvar ölçekli kesikli biyoreaktörlerde anaerobik olarak arıtılması ve optimum işletme koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, organik içeriği yüksek Ardahan kaşar peyniri peynir altı sularının farklı KOI'lerde arıtılabilirliği 5.5 ve 5.0 pH'da incelenmiştir.

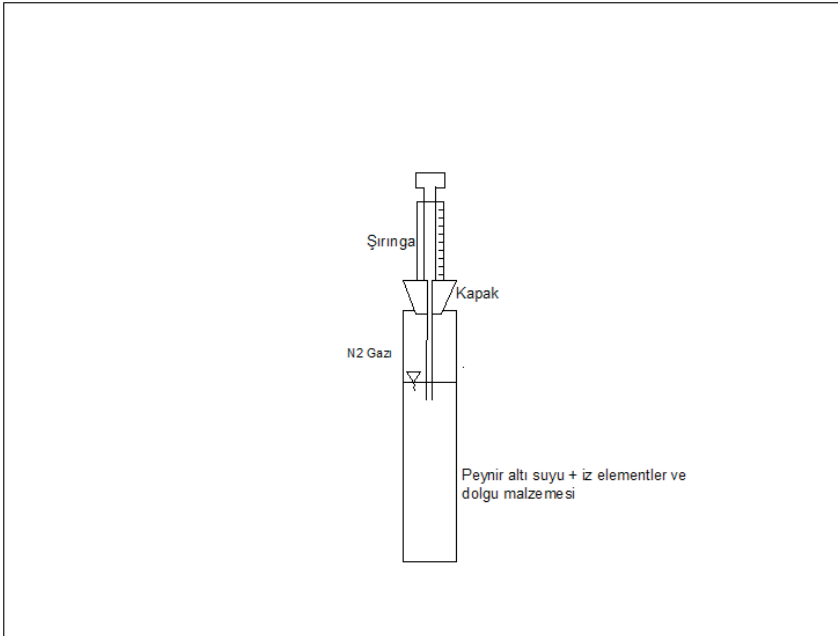
## MATERYAL VE YÖNTEM

### Peynir Altı Suyu ve Anaerobik Bakteri Temini

Anaerobik kesikli biyoreaktörlerin kurulumu ve işletimi öncesinde, peynir altı suyu Göle'de faaliyet gösteren kaşar peyniri üretimi yapan bir firmadan temin edilmiştir. Temin edilen peynir altı suyunun pH değeri 5.52 olarak belirlenmiş, ilk olarak -18 °C'de depolanmış, sonra biyoreaktör kurulumu öncesi +4 °C buzdolabında muhafaza edilerek kullanılmıştır. Anaerobik karışık bakteriler ise, Malatya Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi anaerobik bölmesinden alınmıştır.

### Kesikli Biyoreaktörlerin İçeriği ve İşletimi

1000 mL hacimli anaerobik kesikli biyoreaktörler üç tekrarlı kurularak işletilmiştir. Bu biyoreaktörlerin 900 mL'sini aktif karbon, anaerobik karışık bakteri, peynir altı suyu ve iz ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CuCl}_2$ ) elementler, 100 mL'sini ise gaz tepe boşluğu oluşturmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Kesikli biyoreaktörün şematik gösterimi

Biyoreaktör içeriğinin tamamlanması ile pH ayarlanmış ve kapaklar kapatılmış, akabinde anoksik koşulları oluşturmak için biyoreaktör tepe boşluğu 6 dk süresince  $N_2$  gazından geçirilmiştir. Biyoreaktörler, 35 °C'ye ayarlanmış çalkalamalı inkübatörde (çalkalama ilk 24 saat 160 rpm'de yapılmış) ve etüvde (24 saat sonrası zamanlarda kullanılmış) işletilmiştir. Çalışmada, peynir altı suyunun 5984, 8432 ve 14960 mg KOI/L'de arıtılabilirliği 5.5 ve 5.0 pH'da incelenmiştir. Böylece, hem ekonomik olması hem de çalışma hedeflerinden biri olan gelecek yıllarda peynir altı suyunu arıtma işlemi yaparak alıcı ortamlara deşarj edecek firmalarda kurulabilecek pilot ölçekli tesislere yol gösterici olması hedeflenmiştir.

### **Analitik Yöntemler**

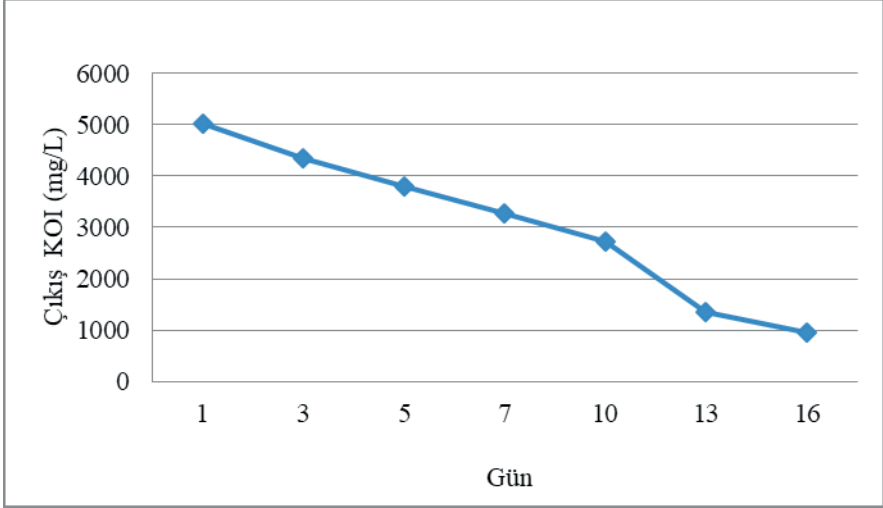
Biyoreaktör pH'sı, 1 M HCl ve NaOH ile ayarlanmış ve örneklem yapılarak KOI deneyi gerçekleştirilmiştir. KOI analizleri standart metoda göre yapılmıştır. Toplam protein oranı, hizmet alımı ile Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde, %0.58 olarak belirlenmiştir.

### **BULGULAR**

Biyoreaktör kurulumları ile, saatlik örneklemeler yapılmıştır. Örnekleme öncesi, biyoreaktörde oluşan gaz, anaerobik koşulları bozmayacak şekilde biyoreaktörden uzaklaştırılmış olup, akabinde örneklem yapılmıştır. Anaerobik sistemler genel olarak, organik kökenli atıksuların arıtılmasında kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, organik yükleme önemli ölçüde azaltılmakta ve hidrolik bekleme süresi genellikle uzun tutulmaktadır. Bu nedenle, anaerobik sürecin başlaması veya ortama alıştırma, karışık sıvıda bulunan anaerob bakterilerin yeni bir ortama uyum sağlamasını gerçekleştirmek için dikkatle yapılmalıdır (Teng ve diğerleri, 2013).

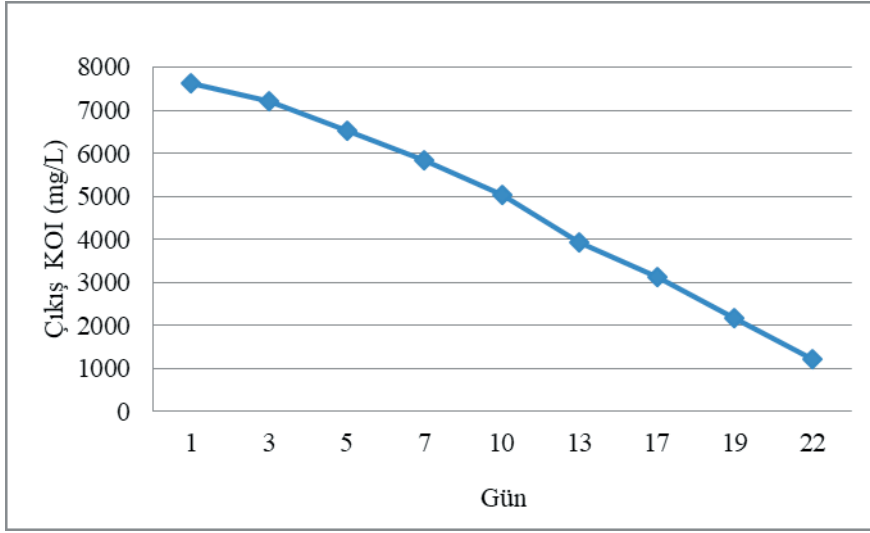
Kesikli biyoreaktörlerde, peynir altı suyunun araştırıldığı sınırlı çalışma bulunmaktadır. Peynir altı suyundan biyometan üretiminin araştırıldığı Abu-Reesh (2014) tarafından yapılmış çalışmada, peynir altı suyunun anaerobik arıtımında metanojenlerin aktivitesini engelleyen uçucu yağ asitleri birikmesi nedeniyle pH'nın önemli ölçüde düştüğü, bunun da düşük gaz verimine ve biyogazın düşük metan içeriğine neden olduğu rapor edilmiştir. 36 °C'de, pH 6.5'de 28 günlük kesikli çalışmada, 18000 mg/L'lik başlangıç KOI'sinde %84'lük KOI giderim verimliliğine ulaşılmıştır. 100 L'lik kesikli reaktörde biyogaz üretimi 20 L olarak saptanmıştır. 8000 mg/L KOI'lik seyreltilmiş peynir altı suyunun, 10 günlük bir bekleme süresinde %100'e yakın KOI giderimi sağladığı ve yaklaşık 20 L biyogaz ürettiği belirlenmiştir. Bu çalışmada ise, üç tekrarlı biyoreaktörler kurulmuştur. 5984, 8432 ve 14960 mg KOI/L'de, pH 5.5'de işletilmiştir. 5984 mg KOI/L'de, günlere göre peynir altı suyu giderimi ortalama so-

nuçları Şekil 2’de verilmiştir. Üç tekrarlı biyoreaktörde ortalama başlangıç KOI’sine göre; birinci günde 952 mg/L giderim olduğu, onaltıncı günde yapılmış analizde ise başlangıca göre giderimin 5032 mg/L olduğu saptanmıştır. Başlangıç KOI’sine göre onaltıncı günde, ortalama KOI gideriminin %84 olduğu tespit edilmiştir.



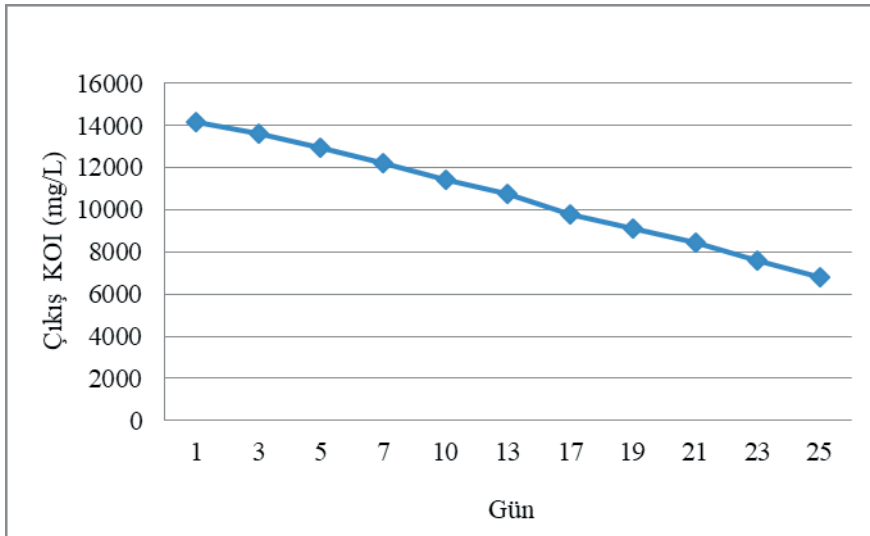
**Şekil 2.** 5984 mg KOI/L giriş peynir altı suyunun 5.5 pH’da günlere göre giderimi

5.5 pH’da, 8432 mg KOI/L’de işletilmiş biyoreaktörde, günlere göre peynir altı suyu giderimi ortalama sonuçları Şekil 3’de verilmiştir. Üç tekrarlı biyoreaktörde ortalama başlangıç KOI’sine göre; birinci günde 816 mg/L giderim olduğu, yirmiikinci günde test edilmiş örnek sonucunda başlangıca göre giderimin 7208 mg/L olduğu saptanmıştır. Başlangıç KOI değerine göre, yirmiikinci günde, ortalama KOI gideriminin %85 olduğu belirlenmiştir.



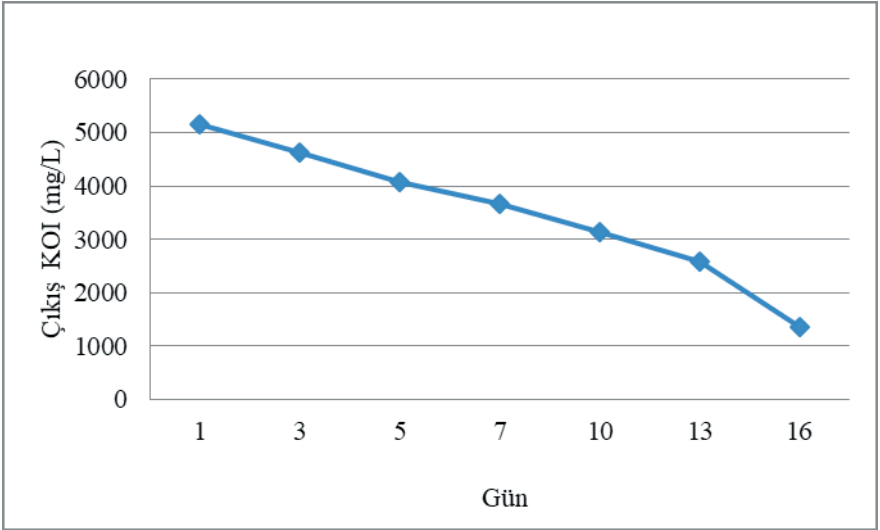
**Şekil 3.** 8432 mg KOI/L giriş peynir altı suyunun 5.5 pH'da günlere göre giderimi

14960 mg KOI/L'de, 5.5 pH'da, günlere göre peynir altı suyu giderimi ortalama sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. Üç tekrarlı biyoreaktörde ortalama başlangıç KOI'sine göre; birinci günde 816 mg/L giderim olduğu, yirmibeşinci günde yapılmış analizde ise başlangıca göre giderimin 8160 mg/L olduğu saptanmıştır. 14960 mg/L başlangıç KOI'sine göre, yirmibeşinci günde ortalama %54.5'lik KOI giderimi olduğu tespit edilmiştir.



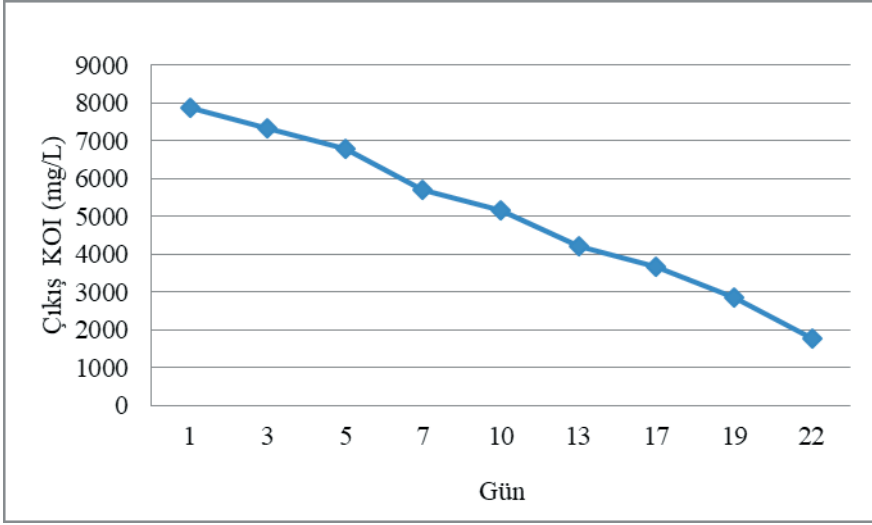
**Şekil 4.** 14960 mg KOI/L giriş peynir altı suyunun 5.5 pH'da günlere göre giderimi

Diğer bir araştırmada da, üç tekrarlı biyoreaktörler 5984, 8432 ve 14960 mg KOI/L'de, pH 5.0'de işletilmiştir. Günlere göre, ortalama başlangıç 5984 mg KOI/L peynir altı suyu gideriminin sonuçları Şekil 5'de verilmiştir. Ortalama başlangıç KOI'sine göre; birinci günde ortalama giderimin 816 mg/L olduğu, onaltıncı gün analiz sonuçlarında ortalama giderimin 4624 mg/L olduğu tespit edilmiştir. Onaltıncı günde ortalama KOI gideriminin, başlangıç KOI'sine göre %77 olduğu belirlenmiştir. Ortalama başlangıç 8432 mg KOI/L peynir altı suyunun günlere göre giderim sonuçları da Şekil 6'da sunulmuştur. Başlangıç KOI'sine göre; ortalama giderimin birinci günde 544 mg/L olduğu, yirmiikinci günde yapılmış analizlerde giderimin 6664 mg/L olduğu saptanmıştır. Başlangıç KOI'sine göre yirmiikinci günde %79 ortalama KOI giderimine ulaşılmıştır.



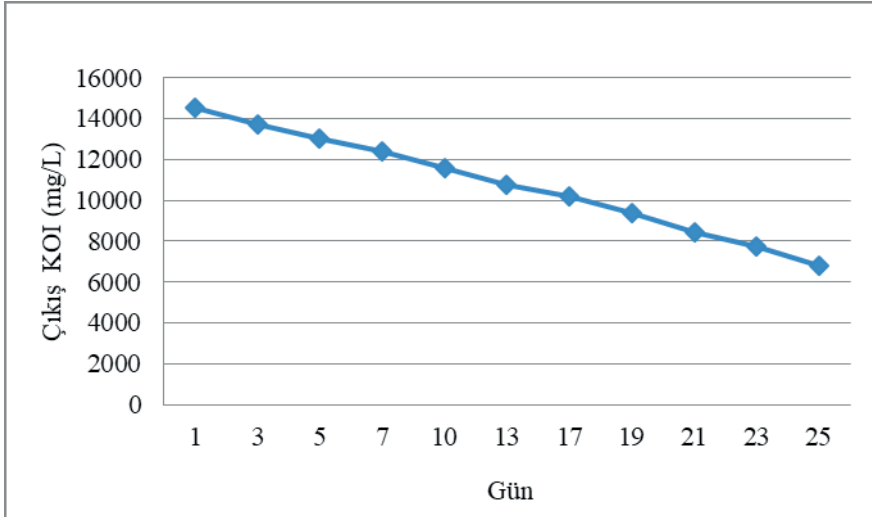
Şekil 5. 5984 mg KOI/L giriş peynir altı suyunun 5.0 pH'da günlere göre giderimi





Şekil 6. 8432 mg KOI/L giriş peynir altı suyunun 5.0 pH'da günlere göre giderimi

5.0 pH'da, üç tekrarlı olarak, 14960 mg KOI/L'de işletilmiş biyoreaktörde, günlere göre peynir altı suyu giderimi ortalama sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Ortalama başlangıç KOI'sine göre; birinci günde 408 mg/L giderim olduğu, yirmibeşinci günde test edilmiş örnek sonucunda başlangıca göre giderimin 8160 mg/L olduğu belirlenmiştir. Başlangıç KOI'sine göre, %54.5 ortalama KOI giderimine yirmibeşinci günde ulaşılmıştır.



Şekil 7. 14960 mg KOI/L giriş peynir altı suyunun 5.0 pH'da günlere göre giderimi

Biyoreaktörlerde, aynı başlangıç KOI'si ile aynı günlerde farklı KOI giderimi sonuçlarına ulaşılması, kesikli biyoreaktör içeriğindeki karışık bakterilerin pH'ya bağlı baskın türleri ile açıklanabilir.

## SONUÇ

Global nüfus artışı, antropojenik olarak ekosistemlerin bozulmasına yol açmıştır. Bu nedenle, toprak ve su kaynaklarının (okyanuslar, göller, nehirler) kirlenmesini önlemek için endüstriyel atıksuların tahliye edilmeden önce uygun şekillerde arıtılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Ardahan (merkez ve ilçesi Göle)'da kaşar peyniri üretimi yapan firmaların fazla miktarda peynir altı suyu elde ediyor oldukları ve bu suyu herhangi bir geri kazanım yada arıtma yapmadan alıcı ortama deşarj ettikleri göz önünde bulundurularak, bu firmaların gelecekte kurmak isteyebileceği pilot ölçekli tesislere yol haritası olması bakımından, laboratuvar ölçekli kesikli biyoreaktörler kurularak 5.5 ve 5.0 pH'da işletilmiş, anaerobik arıtılabilirliği incelenmiştir. Bu kapsamda, başlangıç 5984, 8432 ve 14960 mg KOI/L peynir altı suyu oranlarının, günlere göre giderimi belirlenmiştir. Aynı koşullarda farklı pH'larda işletilmiş biyoreaktörlerden: 5984 mg KOI/L'de, 5.5 pH'da %84 giderime ulaşılırken, 5.0 pH'da %77 giderime; 8432 mg KOI/L'de, 5.5 pH'da %85 giderime ulaşılırken, 5.0 pH'da %79 giderime; 14960 mg KOI/L'de ise, 5.5 ve 5.0 pH'da %54.5 giderime ulaşılmıştır. Yapılmış analiz sonuçlarından her iki pH'nın da arıtılabilirliğe uygun olduğu tespit edilmiştir. Ancak, genel olarak değerlendirildiğinde; 5.0 pH'ya göre, 5.5 pH'da daha iyi arıtma olduğu sonucuna varılmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya, finansal destek sağlayan Ardahan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (Proje No: 2020-007)'ne; hizmet alımının yapıldığı Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezine; cihaz (çalkalamalı inkübatör, etüv) kullanımını destekleyen Ardahan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkez yönetimine teşekkür ederim.

## KAYNAKÇA

- Abu-Reesh, I. M. (2014). Kinetics of anaerobic digestion of labaneh whey in a batch reactor. *African Journal of Biotechnology*, 13(16), 1745-1755.
- Chatzipaschali, A. A., Stamatis, A. G. (2012). Biotechnological utilization with a focus on anaerobic treatment of cheese whey: Current status and prospects. *Energies*, 5, 3492-3525.
- Cruz-Salomón, A., Ríos-Valdovinos, E., Pola-Albores, F., Meza-Gordillo, R., Lagunas-Rivera, S., Ruíz-Valdiviezo, Víctor. M. (2017). Anaerobic treatment of agro-industrial wastewaters for COD removal in expanded granular sludge bed bioreactor. *Biofuel Research Journal*, 16, 715-720.
- Ergüder, T. H., Tezel, U., Güven, E., Demirer, G. N. (2001). Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors. *Waste Management*, 21(7), 643-650.
- Fernández, C., Cuetos, M. J., Martínez, E. J., Gómez, X. (2015). Thermophilic anaerobic digestion of cheese whey: Coupling  $H_2$  and  $CH_4$  production. *Biomass and Bioenergy*, 81, 55-62.
- Gannoun, H., Khelifi, E., Bouallagui, H., Touhami, Y., Hamdi, M. (2008). Ecological clarification of cheese whey prior to anaerobic digestion in upflow anaerobic filter. *Bioresource Technology*, 99(14), 6105-6111.
- Ke, S., Shi, Z., Fang, H. H. P. (2005). Applications of two-phase anaerobic degradation in industrial wastewater treatment. *Int. J. Environment and Pollution*, 23(1), 65-80.
- Lagoa-Costa, B., Kennes, C., Veiga, M. C. (2020). Cheese whey fermentation into volatile fatty acids in an anaerobic sequencing batch reactor. *Bioresource Technology*, 308, 123226.
- Latif, M. A., Ghufuran, R., Wahid, Z. A., Ahmad, A. (2011). Integrated application of upflow anaerobic sludge blanket reactor for the treatment of wastewaters. *Water Research*, 45, 4683-4699.
- Malaspina, F., Cellamare, C. M., Stante, L., Tilche, A. (1996). Anaerobic treatment of cheese whey with a downflow-upflow hybrid reactor. *Bioresource Technology*, 55, 131-139.
- Mockaitis, G., Ratusznei, S. M., Rodrigues, J. A. D., Zaiat, M., Foresti, E. (2006). Anaerobic whey treatment by a stirred sequencing batch reactor (ASBR): effects of organic loading and supplemented alkalinity. *Journal of Environmental Management*, 79, 198-206.
- Ottaviano, L. M., Ramos, L. R., Botta, L. S., Varesche, M. B. A., Silva, E. L. (2017). Continuous thermophilic hydrogen production from cheese whey powder solution in an anaerobic fluidized bed reactor: Effect of hydraulic retention time and initial substrate concentration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 4848-4860.

- Rodgers, M., Zhan, X-M., Dolan, B. (2004). Mixing characteristics and whey wastewater treatment of a novel moving anaerobic biofilm reactor. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 43(8), 2183-2193.
- Shilton, A., Powell, N., Broughton, A., Pratt, C., Pratt, S., Pepper, C. (2013). Enhanced biogas production using cow manure to stabilize co-digestion of whey and primary sludge. *Environmental Technology*, 34(17), 2491-2496.
- Siso, M. I. G. (1996). The biotechnological utilization of cheese whey: A review. *Bioresource Technology*, 57, 1-11.
- Sivakumar, P., Bhagiyalakshmi, M., Anbarasu, K. (2012). Anaerobic treatment of spoiled milk from milk processing industry for energy recovery-A laboratory to pilot scale study. *Fuel*, 96, 482-486.
- Tehrani, N. S., Najafpour, G. D., Rahimnejad, M., Attar, H. (2015). Performance of upflow anaerobic sludge fixed film bioreactor for the treatment of high organic load and biogas production of cheese whey wastewater. *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, 21(2), 229-237.
- Teng, T. T., Wong, Y-S., Ong, S-A., Norhashimah, M., Rafatullah, M. (2013). Start-up operation of anaerobic degradation process for palm oil mill effluent in anaerobic bench scale reactor (ABSR). *Procedia Environmental Sciences*, 18, 442-450.



# Bölüm 5

## TAŞIMA ENTEGRASYONLARININ İNCELENMESİ VE KİYASLANMASI

***Onur DERSE<sup>1</sup>***

---

1 Dr. Öğr. Üyesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye. [onurderse@tarsus.edu.tr](mailto:onurderse@tarsus.edu.tr) ; <https://orcid.org/0000-0002-4528-1999>

## TAŞIMACILIK

Taşımacılık, yolcu veya yüklerin belli bir amaç doğrultusunda yer değiştirmesi olarak tanımlanabilir. Taşımacılık veya ulaştırma hizmetleri olarak adlandırılan bu hizmet sisteminde farklı taşıma modları kullanılabilmektedir. Bu taşıma modları; karayolları, denizyolları, iç su yolları, demir yolları, hava yolları ve boru hattı taşımacılığı olarak sıralanabilir. Belirtilen taşıma modlarının birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıflıkları söz konusudur. Bazı taşıma modları birim maliyet açısından, taşıma kapasitesi açısından avantaj sağlarken bazı taşıma modları daha esnek bir ulaşım ve daha hızlı taşımaya olanak sağlamaktadır. Örneğin, hava yolu taşıma modu çok hızlı bir ulaştırma sağlarken birim maliyet açısından en dezavantajlı taşıma modudur. Deniz yolu taşımacılık modu ise hız açısından dezavantajlı olurken birim maliyet ve kapasite bakımından avantajlı bir taşıma modudur.

Tablo 1’de tek modlu (karayolları, denizyolları, iç su yolları, demir yolları, hava yolları ve boru hattı taşımacılığı) taşıma modlarının maliyet, hız, esneklik ve kapasite açısından kıyaslanması gösterilmektedir.

*Tablo 1. Tek modlu taşıma modlarının kıyaslanması*

| Taşıma modu | Maliyet | Hız    | Esneklik | Kapasite |
|-------------|---------|--------|----------|----------|
| Karayolu    | Orta    | Orta   | Yüksek   | Orta     |
| Denizyolu   | Düşük   | Düşük  | Düşük    | Yüksek   |
| Demir yolu  | Düşük   | Orta   | Düşük    | Yüksek   |
| Hava yolu   | Yüksek  | Yüksek | Düşük    | Orta     |
| İç su yolu  | Düşük   | Düşük  | Düşük    | Orta     |
| Boru hattı  | Düşük   | Düşük  | Düşük    | Düşük    |

Tablo 1’de görüldüğü gibi farklı taşıma modlarının farklı üstün özellikleri bulunmaktadır.

## TAŞIMA ENTEGRASYONU

Yolcu ve yük taşıyıcılar, taşımaları için önemli kriterleri değerlendirirken taşıma modlarının avantajlarını ve dezavantajlarını gözeterek en uygun taşıma modunu seçmeye çalışırlar. Ancak her zaman tek bir taşıma modu ile taşıma gerçekleştirmek yeterli olmaz, bu nedenle taşıyıcılar birden fazla taşıma modunu aynı anda kullanmak yoluna da gidebilirler. Taşımanın akıcılığını sağlamak için kullanılan entegrasyon “taşımacılık entegrasyonu” olarak tanımlanabilir. Taşıma entegrasyonu kapsamında taşıma maliyetlerinin ve toplam taşıma süresinin azaltılmasına kadar birçok konuda avantaj sağlanabilmektedir. Vural ve ark. [1] taşıma entegrasyonları için, her bir ulaştırma türünün, maliyet, sürat, hizmet, güvenilirlik ve güvenlik anlamında avantajlı olduğu yönler bulunmaktadır. Bu kapsamda



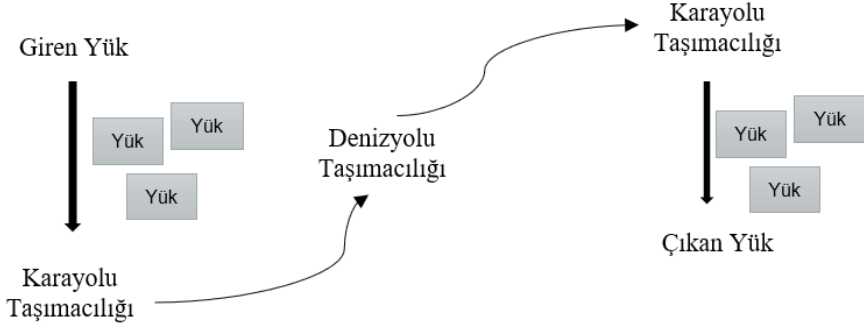
günümüzde her bir ulaştırma türünün en verimli şekilde kullanılmasını sağlayan taşımacılık entegrasyonu sistemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır şeklinde ifade de bulunmuşlardır.

Yük taşımacılığı kapsamında farklı taşımacılık entegrasyonu yaklaşımları uygulanabilir. Yıllar geçtikçe, literatürde ve endüstride farklı terminolojiler ortaya çıkmıştır: çok modlu taşımacılık, intermodal (modlar arası) taşımacılık, kombine taşımacılık ve senkromodal taşımacılık bu terminolojiler olarak sayılabilir [2].

### Çok Modlu Taşımacılık

Çok modlu taşımacılık, malların en az iki farklı taşıma modu ile taşınması olarak tanımlanmaktadır [3]. Modlar arası taşımacılık taşıma birimine, kombine taşımacılık taşıma aracına, senkromodal taşımacılık ise esnekliğe odaklanırken çok modlu taşımacılık bu taşıma entegrasyonlarını kapsayarak birden fazla taşıma modunun kullanılmasını ifade eder. Geleneksel olarak yüklerin her bir mod değişiminde elleçlenmesi gerçekleşir.

Şekil 1, örnek bir çok modlu taşımacılığı temsil eder. Bunun dışında farklı tek modlu taşıma modlarının entegrasyonu da söz konusu olabilir. Entegre olarak karayolu taşımacılığı-demir yolu taşımacılığı, karayolu taşımacılığı-hava yolu taşımacılığı, karayolu taşımacılığı-denizyolu taşımacılığı-demir yolu taşımacılığı ve daha farklı taşıma entegrasyonları gerçekleştirilebilir.



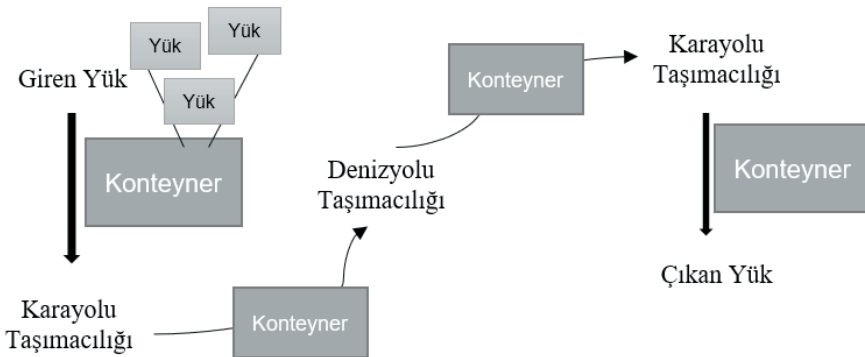
Şekil 1. Çok modlu taşımacılık için örnek bir gösterim

Çok modlu taşımacılık ile ilgili yapılan çalışmalar mevcuttur. Paçacı et al. [4] çalışmasında, çok modlu taşımacılık uygun lojistik merkez yer seçimi için bir öneri sunmaktadır. Nitsenko et al. [5] çalışmasında, multimodal taşımacılığın lojistiğine ilişkin kararlar alınırken risk ve belirsiz süreçler gibi durumları ele almaktadır.

### Modlar Arası (İntermodal) Taşımacılık

Modlar arası (İntermodal) taşımacılık, yüklerin bir taşıma birimi içerisinde iki veya daha fazla taşıma türü ile taşınması olarak tanımlanmaktadır. Başlangıç noktasında taşıma birimi içerisindeki yük bitiş noktasında açılır. Taşıma biriminin veya taşıma kabının tek bir yük gibi hareketi sağlanır. Bu durumda taşıma birimi içerisindeki yüklerin aktarılması aşamasında elleçlenmesine ihtiyaç duyulmaz. Ayrıca, 1990'lerden bu yana yük dağıtımında intermodal taşımacılık araştırmalarında önemli bir büyüme olmuştur [6]. Kurtuluş and Çetin [7] çalışmasında, Türkiye'de Denizli bölgesi ile İzmir limanları arasındaki kısa mesafeli bir iç konteyner taşımacılığı koridorunu ele alarak intermodal taşımacılık sistemlerini incelemektedir. Çalışmada, ulaşım modları beş özellikle tanımlanmıştır: ulaşım maliyeti, geçiş süresi, gecikme yüzdesi, sıklık ve boş zaman. Tadić et al. [8] çalışmasında lojistik faaliyetlerin (özellikle taşımacılık) çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak ve aynı zamanda lojistik sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla intermodal taşımacılık sistemlerinin geliştirilmesi, bulanık SWARA ve bulanık MARCOS yöntemlerine dayanan yeni bir hibrit çok kriterli karar verme (ÇKKV) modeli ile incelenmektedir. Agamez-Arias and Moyano-Fuentes [6] çalışmasında, intermodal taşımacılık için sistematik bir literatür tarama gerçekleştirmektedir.

Şekil 3'de modlar arası (intermodal) taşımacılığını temsil eden bir örnek gösterilmektedir. Şekilde ifade edilen giren yük kısmındaki konteyner içerisindeki yükler ile elleçleme yapılmadan sistem sonunda bitiş noktasına ulaşır. Gösterim örnek amaçlıdır farklı taşıma modları ile çeşitlendirilebilir.

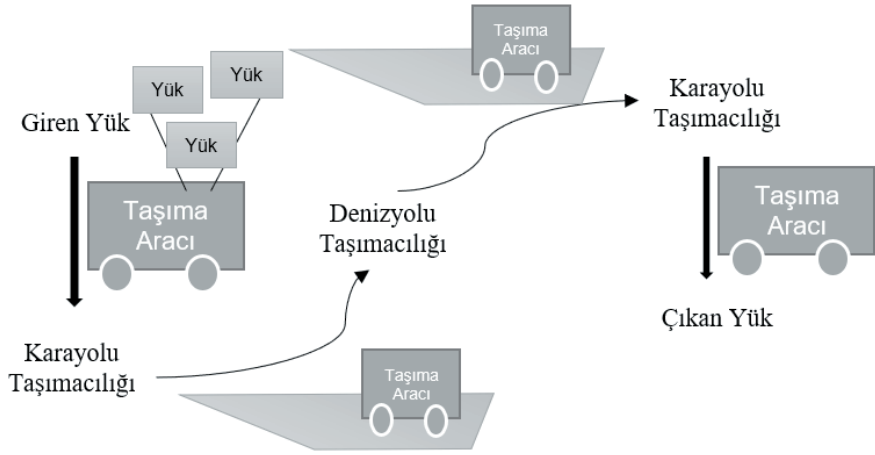


Şekil 3. Modlar arası taşımacılık için örnek bir gösterim

### Kombine Taşımacılık

Kombine taşımacılık, yüklerin bir taşıma aracı içerisinde iki veya daha fazla taşıma türü ile taşınmasıdır. Bu taşıma entegrasyonunda başlangıç noktasında taşıma aracına yüklenen yüklerin aktarılması aynı taşıma aracıyla sağlanır.

Şekil 4’de kombine taşımacılık için örnek bir gösterim mevcuttur. Şekilde görüldüğü gibi başlangıç noktasında taşıma aracındaki giren yüklerin bitiş noktasına kadar taşıma araçları değişiklik göstermemektedir. Şekilde karayolu taşımacılığında faaliyet gösteren aracın RO-RO gemisine ve daha sonra tekrardan faaliyetine karayolunda devam edip bitiş noktasına ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4. Kombine taşımacılık için örnek bir gösterim

Equi et al. [9] çalışmasında, combined taşımacılığı ve çizelgelenmesini ele almaktadır. Frémont and Franc [10] çalışmasında, kombine taşımacılığın, karayolu taşımacılığı ile rekabet edilebilirliğini incelemektedir. Kombine taşımacılığın fiyat açısından rekabet edilebilir olduğu gösterilmektedir.

### Senkromodal Taşımacılık

Senkromodal taşımacılık, taşıyıcıların veya müşterilerin herhangi bir zamanda operasyonel koşullara ve/veya müşteri gereksinimlerine göre en iyi modu bağımsız olarak seçebileceği taşıma modu olarak tanımlanabilir [11].

Yee ve ark. [12] senkromodal taşımacılık planlamasını transit halindeki gönderi hakkında gerçek zamanlı bilgilere dayalı olarak gönderileri ara terminallerde alternatif taşıma modlarına yeniden yönlendirme olasılığı ile tanımlar. Batarliené and Şakalys [13] çalışmasında, Senkromodal ta-

şımıcılığı eşzamanlılık, verimlilik ve çevresel etki açısından farklı taşıma modlarının ve taşıma düğümünün faydalarını en üst düzeye çıkarmak için bilgilerin hızlı bir şekilde değiş tokuş edildiği bir yük taşımacılığı süreci olarak tanımlanmaktadır.

Senkromodal taşımacılık diğer taşıma entegrasyonlarına göre daha güncel bir kavram olup *“esnekliği temel alarak anlık bir biçimde uygun mod seçiminin gerçekleştirilebilmesi”* olarak tanımlanabilir.

Senkromodal taşımacılık ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde; Guo et al. [14] çalışmasında senkromodal taşımacılığı ele almaktadır. Behdani et al. [15] çalışmasında, senkromodal yük taşımacılığı için entegre görünümün ayrıntılı bir tanımını vermektedir. Çalışmada, senkromodal yük taşıma sistemleri için hizmet çizelgelerinin tasarlanması için bir matematiksel model sunulmaktadır. Delbart et al. [16] çalışmasında, belirsizlik içeren intermodal ve senkromodal taşımacılık hakkındaki literatürü gözden geçirerek, belirsizliğin etkilerini azaltmak için önlemler sunarak ve gelecekteki araştırma yönleri önererek araştırma alanına katkıda bulunmaktadır.

### TAŞIMA ENTEGRASYONLARININ KIYASLANMASI

Tek modlu taşıma türlerinin avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için kullanılan taşıma entegrasyonlarının temel olarak aşağıdaki avantajları sağladıkları ifade edilebilir.

- ✓ Malların daha hızlı bir şekilde ulaşımının sağlanması
- ✓ Toplam maliyetin azaltılması
- ✓ Elleçleme faaliyetlerinin azalması
- ✓ Ortaya çıkan toplam hasarın azaltılması
- ✓ Formalitelerin azaltılması

Belirtilen avantajların boyutu her taşıma entegrasyonu için aynı değildir. Farklı değerlendirme kriterleri için farklı taşıma entegrasyonları daha avantajlı olabilir. Taşıma entegrasyonlarının kıyaslanması için önemli olan bazı değerlendirme kriterleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Maliyet: Toplam maliyet olarak değerlendirilecek olup elleçleme maliyeti, taşıma maliyeti gibi maliyetleri kapsamaktadır.
- Hız: Toplam taşıma hızını ifade etmektedir.
- Hasar: Taşıma gerçekleşirken hasar meydana gelme durumunu ifade etmektedir.
- Karmaşıklık: Taşıma entegrasyonunun uygulanabilmesi için uygulanacak olan işlemlerin aşamalarını/zorluğunu ifade eder.

- Esneklik: Uygulana taşıma entegrasyonunun değişen şartlara uyumunu ifade etmektedir.
- Güvenlik: Taşıma güvenliğini ifade etmektedir.
- Çevre duyarlılığı: Taşıma gerçekleşirken çevreye verilen etkiyi ifade eder.

Belirtilen değerlendirme kriterleri Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri ile incelenebilir ve en uygun taşıma entegrasyonuna karar verilebilir. Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri, birbiriyle çelişen birden fazla kriteri değerlendirerek en uygun alternatifi seçmek için kullanılabilir.

Taşıma entegrasyonlarının kıyaslandırılabilmesi için kullanılabilecek olan yöntemlerden olan ve Saaty [17] tarafından geliştirilmiş olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi, Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biridir ve karar vericiler için faktörlerle ikili karşılaştırmalarının değerlendirilmesinin gerçekleştirildiği bir yöntemdir. Yöntemde ikili karşılaştırma gerçekleştirilirken 1 eşit önemli, 3 biraz daha önemli, 5 orta derecede önemli, 7 güçlü derecede önemli ve 9 çok önemli olacak şekilde 1 ile 9 arasındaki sayılarla değerlendirme gerçekleştirilir.

Tablo 1’de değerlendirme kriterlerinin uzman görüşü alınarak kıyaslanması gösterilmektedir. Değerlendirme kriterleri 1 ile 9 arasındaki ölçekle kıyaslanmaktadır.

*Tablo 1. Değerlendirme kriterlerinin kıyaslanması*

| Değerlendirme Kriterleri | Maliyet | Hız  | Hasar | Karmaşıklık | Esneklik | Güvenlik | Çevre duyarlılığı |
|--------------------------|---------|------|-------|-------------|----------|----------|-------------------|
| <b>Maliyet</b>           | 1,00    | 3,00 | 3,00  | 5,00        | 5,00     | 0,33     | 3,00              |
| <b>Hız</b>               | 0,33    | 1,00 | 0,33  | 5,00        | 3,00     | 0,20     | 0,33              |
| <b>Hasar</b>             | 0,33    | 3,00 | 1,00  | 3,00        | 3,00     | 0,20     | 1,00              |
| <b>Karmaşıklık</b>       | 0,20    | 0,20 | 0,33  | 1,00        | 1,00     | 0,20     | 0,33              |
| <b>Esneklik</b>          | 0,20    | 0,33 | 0,33  | 1,00        | 1,00     | 0,14     | 0,33              |
| <b>Güvenlik</b>          | 3,00    | 5,00 | 5,00  | 5,00        | 7,00     | 1,00     | 3,00              |
| <b>Çevre duyarlılığı</b> | 0,33    | 3,00 | 1,00  | 3,00        | 3,00     | 0,33     | 1,00              |

Uygulanan AHP adımları sonucunda Tablo 2’deki gibi değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları gösterilmektedir.

Tablo 2. Değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları

| Değerlendirme Kriterleri | Ağırlıklar |
|--------------------------|------------|
| Maliyet                  | 0,2225     |
| Hız                      | 0,089182   |
| Hasar                    | 0,114394   |
| Karmaşıklık              | 0,04103    |
| Esneklik                 | 0,038869   |
| Güvenlik                 | 0,371726   |
| Çevre duyarlılığı        | 0,122299   |

Modlar arası (intermodal) taşımacılık, kombine taşımacılık ve senkromodal taşımacılık temel taşıma entegrasyonları olarak ele alındığında Tablo 3'de maliyet açısından kıyaslamaları gösterilmektedir.

Tablo 3. Maliyet açısından taşıma entegrasyonlarının kıyaslanması

| Taşıma Entegrasyonları                | Modlar Arası (Inter-modal) Taşımacılık | Kombine Taşımacılık | Senkromodal Taşımacılık |
|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | 1,00                                   | 3,00                | 3,00                    |
| Kombine Taşımacılık                   | 0,33                                   | 1,00                | 5,00                    |
| Senkromodal Taşımacılık               | 0,33                                   | 0,20                | 1,00                    |

Tablo 4. Hız açısından taşıma entegrasyonlarının kıyaslanması

| Taşıma Entegrasyonları                | Modlar Arası (Inter-modal) Taşımacılık | Kombine Taşımacılık | Senkromodal Taşımacılık |
|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | 1,00                                   | 0,33                | 0,20                    |
| Kombine Taşımacılık                   | 3,00                                   | 1,00                | 0,33                    |
| Senkromodal Taşımacılık               | 5,00                                   | 3,00                | 1,00                    |

Tablo 5. Hasar açısından taşıma entegrasyonlarının kıyaslanması

| Taşıma Entegrasyonları                | Modlar Arası (Inter-modal) Taşımacılık | Kombine Taşımacılık | Senkromodal Taşımacılık |
|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | 1,00                                   | 0,33                | 0,33                    |
| Kombine Taşımacılık                   | 3,00                                   | 1,00                | 0,33                    |
| Senkromodal Taşımacılık               | 3,00                                   | 3,00                | 1,00                    |

Tablo 6. Karmaşıklık açısından taşıma entegrasyonlarının kıyaslanması

| Taşıma Entegrasyonları                | Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | Kombine Taşımacılık | Senkromodal Taşımacılık |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | 1,00                                  | 3,00                | 7,00                    |
| Kombine Taşımacılık                   | 0,33                                  | 1,00                | 3,00                    |
| Senkromodal Taşımacılık               | 0,14                                  | 0,33                | 1,00                    |

Tablo 7. Esneklik açısından taşıma entegrasyonlarının kıyaslanması

| Taşıma Entegrasyonları                | Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | Kombine Taşımacılık | Senkromodal Taşımacılık |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | 1,00                                  | 3,00                | 0,20                    |
| Kombine Taşımacılık                   | 0,33                                  | 1,00                | 0,14                    |
| Senkromodal Taşımacılık               | 5,00                                  | 7,00                | 1,00                    |

Tablo 8. Güvenlik açısından taşıma entegrasyonlarının kıyaslanması

| Taşıma Entegrasyonları                | Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | Kombine Taşımacılık | Senkromodal Taşımacılık |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | 1,00                                  | 0,33                | 0,33                    |
| Kombine Taşımacılık                   | 3,00                                  | 1,00                | 0,33                    |
| Senkromodal Taşımacılık               | 3,00                                  | 3,00                | 1,00                    |

Tablo 9. Çevre duyarlılığı açısından taşıma entegrasyonlarının kıyaslanması

| Taşıma Entegrasyonları                | Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | Kombine Taşımacılık | Senkromodal Taşımacılık |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık | 1,00                                  | 3,00                | 0,50                    |
| Kombine Taşımacılık                   | 0,33                                  | 1,00                | 0,33                    |
| Senkromodal Taşımacılık               | 2,00                                  | 3,00                | 1,00                    |

Tablo 10'da ele alınan maliyet, hız, hasar, karmaşıklık, esneklik, güvenlik, çevre duyarlılığı değerlendirme kriterleri için modlar arası (intermodal) taşımacılık, kombine taşımacılık ve senkromodal taşımacılık için kıyaslama sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 10. Taşıma entegrasyonlarının kıyaslanması

| Taşıma Entegrasyonları                       | Değerlendirme Kriterleri |          |          |             |          |          |                   |
|----------------------------------------------|--------------------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------------|
|                                              | Maliyet                  | Hız      | Hasar    | Karmaşıklık | Esneklik | Güvenlik | Çevre duyarlılığı |
| <b>Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık</b> | 0,549206                 | 0,106156 | 0,139927 | 0,668697    | 0,193186 | 0,139927 | 0,333766          |
| <b>Kombine Taşımacılık</b>                   | 0,331217                 | 0,260498 | 0,286447 | 0,243101    | 0,083308 | 0,286447 | 0,141558          |
| <b>Senkromodal Taşımacılık</b>               | 0,119577                 | 0,633346 | 0,573626 | 0,088202    | 0,723506 | 0,573626 | 0,524675          |

Uygulanan AHP adımları sonucunda taşıma entegrasyonlarının sıralaması Tablo 11’de görülmektedir.

Tablo 11. Taşıma entegrasyonlarının sıralanması

| Taşıma Entegrasyonları                       | Sıralaması |
|----------------------------------------------|------------|
| <b>Modlar Arası (Intermodal) Taşımacılık</b> | 0,275      |
| <b>Kombine Taşımacılık</b>                   | 0,267      |
| <b>Senkromodal Taşımacılık</b>               | 0,458      |

Taşıma entegrasyonları olarak ele alınan modlar arası (intermodal) taşımacılık, kombine taşımacılık ve senkromodal taşımacılık çok modlu taşımacılığın özel alt türleridir. Tablo 10 incelendiğinde; modlar arası taşımacılığın maliyet ve karmaşıklık açısından daha avantajları olduğu görülürken Senkromodal taşımacılığın ise hız, hasar, esneklik, güvenlik ve çevre duyarlılığı kriterleri açısından daha avantajlı olduğu görülmektedir. Tablo 11’de ise tüm değerlendirme kriterleri bir arada incelendiğinde senkromodal taşımacılığın farklı bir üstünlüğe sahip olduğu ve daha fazla kullanım alanı bulması gerektiği görülmektedir.



## KAYNAKÇA

1. Vural D, Gencer C, Karadoğan D. (2014). Ulaştırma uygulamalarına yönelik çok modlu model önerisi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 13(1), 75-105.
2. SteadieSeifi M, Dellaert NP, Nuijten W, Van Woensel T, Raoufi R. (2014). Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European journal of operational research*, 233(1), 1-15.
3. UNECE (2009). *Illustrated glossary for transport statistics*. ISBN: 978-92-79-17082-9.
4. Paçacı B, Serpil E, Çubuk K. Çok Modlu Taşımacılığa Uygun Lojistik Merkez Yer Seçimi İçin Bir Öneri: Türkiye Uygulaması. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
5. Nitsenko V, Kotenko S, Hanzhurenko I, Mardani A, Stashkevych I, Karakai M. (2020). Mathematical modeling of multimodal transportation risks. In *Recent Advances on Soft Computing and Data Mining: Proceedings of the Fourth International Conference on Soft Computing and Data Mining (SCDM 2020)*, Melaka, Malaysia, January 22– 23, 2020 (pp. 439-447). Springer International Publishing.
6. Agamez-Arias ADM, Moyano-Fuentes J. (2017). Intermodal transport in freight distribution: a literature review. *Transport Reviews*, 37(6), 782-807.
7. Kurtuluş E, Çetin İB. (2020). Analysis of modal shift potential towards intermodal transportation in short-distance inland container transport. *Transport Policy*, 89, 24-37.
8. Tadić S, Kilibarda M, Kovač M, Zečević S. (2021). The assessment of intermodal transport in countries of the danube region. *International Journal for Traffic & Transport Engineering*, 11(3).
9. Equi L, Gallo G, Marziale S, Weintraub A. (1997). A combined transportation and scheduling problem. *European journal of operational research*, 97(1), 94-104.
10. Frémont A, Franc P. (2010). Hinterland transportation in Europe: Combined transport versus road transport. *Journal of transport geography*, 18(4), 548-556.
11. Verweij K. (2011). Synchronic modalities – critical success factors. *Logistics yearbook edition*, 75-88.
12. Yee H, Gijsbrechts J, Boute R. (2021). Synchromodal transportation planning using travel time information. *Computers in Industry*, 125, 103367.
13. Batarlienė N, Šakalys R. (2021). Mathematical model for cargo allocation problem in synchromodal transportation. *Symmetry*, 13(4), 540.
14. Guo W, Atasoy B, van Blokdland WB, Negenborn RR. (2020). A dynamic shipment matching problem in hinterland synchromodal transportation. *Decision Support Systems*, 134, 113289.
15. Behdani B, Fan Y, Wiegman B, Zuidwijk R. (2014). Multimodal schedule

- design for synchromodal freight transport systems. Behdani, B., Fan, Y., Wiegman, B., & Zuidwijk, 424-444.
16. Delbart T, Molenbruch Y, Braekers K, Caris A. (2021). Uncertainty in inter-modal and synchromodal transport: Review and future research directions. *Sustainability*, 13(7), 3980.
  17. Saaty T. L. (1980). *The analytical hierarchy process, planning, priority*. RWS publications, USA.

# Bölüm 6

## BENTONİTLERİN OLUŞUMU, SINIFLANDIRILMASI VE KULLANIM ALANLARI

***Onur Eser KÖK<sup>1</sup>, Adil ÖZDEMİR<sup>2</sup>, Yasin ERDOĞAN<sup>3</sup>***

---

1 İskenderun Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü, Hatay-Türkiye

2 Atatürk Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Erzurum-Türkiye

3 T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara-Türkiye

## 1. Jeolojik Oluşum

Bentonit, içeriğinde bol miktarda camsı malzeme bulunduran volkanik kül, lav ve tüflerin kimyasal mekanizmalar sonucunda ayrışması sonucunda meydana gelmektedir. İçeriğindeki camsı minerallerin duraysız özellik göstermesi sonucunda hidroliz yoluyla montmorillonit minerali oluşmaktadır. Bu oluşum aşamaları ise silisyum alüminyum yapısının ayrışması, ayrışan yapının montmorillonit minerali formunda yeniden oluşması ve kasyon konsantrasyonu yüksek eriyiklerin gözeneklerde yer alması ve mevcut yapıdan fala silisyumun çökeltilmesi olarak ifade edilmektedir (Kök, 2017).

Bentonitlerin oluşumu için kaynak konumundaki volkanik tüf ve külün alkali elementleri mutlaka içermesi ve alterasyon ortamı olması gerekmektedir (şekil 1). Düşük miktarda alkali veya toprak alkali elementin bulunduğu durumlarda bentonit yerine halloysit ya da allofan oluşumu gerçekleşmektedir. Camsı malzemeleri yüksek konsantrasyonda içeren bileşenlerden kaynaklı bentonit oluşumu aşağıda verilen üç gruba ayrılmaktadır.

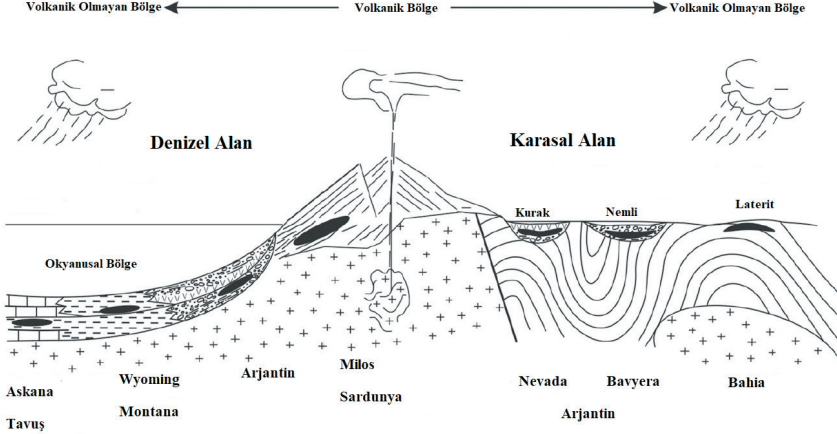
- Diyajenetik alterasyon
- Hidrotermal alterasyon
- Meteorik veya yüzeysel ayrışma

Diyajenetik alterasyon ile bentonit oluşumunda temel olarak çökel havzalarda yer alan sulu ortamlarda volkanit ve tüfler kimyasal reaksiyonlar sonucu ayrışmakta ve alterasyona uğrayarak yeni bir yapı meydana getirmektedir. Denizel çökel ortamlarda yığılma gösteren volkanik maddeler istiflenmeden önce jeokimyasal, mineralojik ve kristal yapısı bakımından değişime uğrarlar. Bentonit oluşumu ise bu değişimlerin sonucunda meydana gelmektedir (Akbulut, 1996).

Hidrotermal alterasyon ile bentonit oluşumu, temelde volkanizma kökenli buhar ve gazların yer kabuğundaki kırık, çatlak veya yarıklar aracılığı ile yüzeye çıkması ve kayaçların yapısında değişim meydana getirmesi olarak tanımlanmaktadır. Volkanik kökenli gaz ve su buharları ile birlikte asidik yapıdaki magmatik kayaçlarda değişimler meydana gelmektedir. Bu durumdaki lav, t f ve küllerin değişime uğraması sonucunda da bentonit oluşumu sağlanmaktadır (Savage ve ark., 2007).

Meteorik ve yüzeysel ayrışma ile bentonit oluşumunda volkanik kül ve tüflerin yağmur, rüzgar, sel gibi iklim koşullarına bağlı olarak kimyasal ayrışması sonucunda bentonit meydana gelmektedir (Akbulut, 1996). Volkanik kül ve tüflerden meydana gelen kayaçlar camsı yapıda, poroz ve düşük sertlik özelliklerine sahiptirler. Karasal ortamlarda meydana ge-

len bentonitlerin bazı türlerinde ise ardalanma tabakalara, volkanik camsı malzemelere ve tuf kalıntılarına da rastlanabilmektedir. Ancak genellikle kayacın yeryüzüne yakın olan kısımlarında bentonit rezervleri belirgin olarak görülmektedir (Dumlupınar, 2008).



Şekil 1. Çeşitli bentonit yataklarında karşılaşılan çökelme ve alterasyon ortamları (Köster ve ark., 2019)

## 2. Sınıflandırma ve Adlandırılması

Bentonitler, tetrahedral ve oktahedral tabakalarında meydana gelen elektriksel yük dengesizliğini gidermek amacıyla iyon değişimi yapmaktadırlar. Bu iyon değişimi sonrasında elektriksel olarak nötr hale gelmelerine rağmen kimyasal içerik ve bağ yapıları bakımından çeşitlilikler oluşturmaktadır. Kimyasal bileşimlerinde bulundurdıkları iyonların konsantrasyonuna göre ise bir sınıflandırma yapılabilmekte ve bu sınıflandırma sonucu kullanım alanlarına göre optimal bentonit türü belirlenerek teknolojik faaliyetlerde kullanılmaktadır (Tüysüz, 2016; Kozak ve ark., 2002).

Dominant iyon sınıflandırması, bentonit kimyasal bileşiminde bulunan oksitlere göre yapılmaktadır. Ancak genel olarak bir yaklaşım sağlamak amacıyla kimyasal analiz sonuçlarına dayanan ve  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{MgO}$  olmak üzere dört temel bileşik ile bir belirleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem Kütle Oranı (Mass Ratio, MR) olarak tanımlanmakta ve hesaplama yöntemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{MR} = \frac{\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

Kütle oranı hesaplaması, kimyasal analiz sonuçlarına göre hesaplanmaktadır. Bu oran 1'den büyük ise sodyum tipi (Na-B), 1/3 ile 1 aralığında ise ara tip (Na/Ca-B) ve 1/3 değerinden küçük ise kalsiyum tipi (Ca-B) ola-

rak adlandırılmaktadır (Avcı, 2009;  inku, 2008; Tüysüz, 2016;  etinel, 2008; Karagüzel ve ark., 2010).

### **Sodyum Tip (Na-B) Bentonit**

Na-B, kısaca baskın minerali sodyum olan montmorillonitleri yüksek miktarda ihtiva eden bentonit tipi olarak tanımlanmaktadır. Bu bentonit tipinde pozitif yük ihtiyacı  $\text{Na}^+$  iyonu ile sağlanarak elektriksel yük dengesi sağlanmaktadır. Yüksek oranda şişme özelliği (hacimce 10-15 kat) ve viskozitesi ile sulu süspansiyonlarının reolojisiyle diğer iki tip bentonit türünden ayrılan Na-Ben, olarak sondaj sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır ( zdemir ve  zcan, 2007; Tüysüz, 2016; Kök, 2017; Erdoğan ve ark., 2021; Erdoğan ve Kök, 2019a).

### **Ara Tip (Na/Ca-B) Bentonit**

Na/Ca-B, tam anlamıyla baskın bir minerali bulunmayan fakat sodyum ve kalsiyumun eşit oranda baskınlık gösterdiği montmorillonitleri yüksek miktarda ihtiva eden bentonit tipi olarak tanımlanmaktadır. Kısa- ca Na-Ben ve Ca-Ben karışımı olarak da ifade edilebilmektedir. Bu bentonit tipinde, pozitif yük ihtiyacı  $\text{Na}^+$  ve  $\text{Ca}^{+2}$  iyonları ile birlikte giderilerek elektriksel yük dengesi sağlanmaktadır. Bu tipe ait olan bentonitler, diğer iki tip bentonit türünün karakteristik özelliklerini paylaşırlar. Orta derecede şişme özelliği (hacimce 5-7 kat) gösterirler ve sulu süspansiyonlarının reolojik özellikleri ve viskozitesi Na-Ben ile hazırlanan süspansiyonlara kıyasla daha düşük, Ca-Ben ile hazırlananlara göre ise daha yüksektir ( inku, 2008; Bloodworth ve ark., 1993).

### **Kalsiyum Tip (Ca-B) Bentonit**

Ca-B, baskın minerali kalsiyum olan montmorillonitlerden meydana gelen bentonit tipi olarak tanımlanmaktadır. Farklı sebeplerden dolayı meydana gelen elektriksel yük dengesizliğinde pozitif yük ihtiyacı  $\text{Ca}^{+2}$  iyonu ile sağlanarak elektriksel açıdan nötr duruma gelmektedirler. Diğer iki bentonit tipine kıyasla şişme özelliği oldukça düşük (hacimce 2-4 kat) olan Ca-Ben, sulu süspansiyonlarının düşük viskozite göstermesi ve asit ile reaksiyonu sonucunda köpürmesi ile karakterize edilmektedir. Yaygın olarak kedi kumu ve ağartıcı malzeme amacıyla kullanılmaktadır (Mingelgrin ve ark., 1978; Tüysüz, 2016).

## **3. Kullanım Alanları**

Bentonitler, en çok kullanım alanına sahip olan kil türleri arasındadır. İhtiyaç doğrultusunda ham halinde veya aktivasyon uygulanarak çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır.

## Sondaj Sektöründe Kullanımı

Sondaj sektörü, ülkemizde bentonit tüketiminin en fazla olduğu alandır. Petrol, doğalgaz veya jeotermal sondajların yapılmasında önemli rol oynamaktadır. Sondaj esnasında ‘çamur’ olarak adlandırılan ve bentonit-su süspansiyonundan oluşan viskoz sıvının kuyu içerisinde sirkülasyonu sağlanmaktadır. Bazı kuyu koşullarında bentonit su süspansiyonuna reolojik özellikleri düzenleyebilmek amacıyla organik veya sentetik katkı malzemeleri de kullanılmaktadır. Ancak hazırlanan bu çamur sistemlerinin temelini bentonitler oluşturmaktadır. Bentonit katkılı sondaj çamuru birçok yönden sondajın ilerleyişine önemli katkıda bulunmaktadır. Delinen kayaç ile sondaj matkabı arasında sürtünme sonucu meydana gelen ısının düşürülmesi, matkap tarafından kesilen kayaç parçacıklarının (cutting) sirkülasyon esnasında yüzeye taşınması, sondaj dizi elemanlarında (tijler, ağırlık boruları, bağlantı ekipmanları, matkap vb.) meydana gelebilecek aşınmaların önlenmesi, yeraltı akışkanlarından kaynaklı korozyonun ve malzeme deformasyonunun engellenmesi, dönme hareketi sonucu oluşan tork kuvvetinin azaltılması, sondajın veya sirkülasyonun durduğu zamanlarda kesilen cuttinglerin çamur içerisinde askıda tutularak kuyu tabanında birikmesini önlemek, kuyu cidarında geçirimsiz bir tabaka (çamur keki) oluşturarak hem sirkülasyon sistemini hem de sondaj dizisini izole bir duruma getirerek yeraltı akışkanlarının etkilerinden korumak gibi çok sayıda önemli etkisi bulunmaktadır (Erdoğan ve ark., 2017a; Erdoğan ve ark., 2017b; Özdemir ve Özcan, 2007; Çinku, 2008; Kök, 2017).

Sondaj sektöründe bahsedilen özellikleri sağlaması için yüksek şişme özelliğine sahip, tiksotropik özelliği fazla, su geçirimi az ve jelleşme oranı yüksek Na-Ben tip bentonitler kullanılmaktadır. Na/Ca-Ben veya Ca-Ben tipi bentonitler şişme özelliklerinin düşüklüğü sebebiyle reolojik özellikleri de düşük olmaktadır. Dolayısı ile sondaj kuyularında etkisi daha az olmaktadır (Avcı, 2009; Erdoğan ve Kök, 2020; Erdoğan ve Kök, 2019b; Kök ve ark., 2018).

Sondaj sektöründe Na-Ben ile hazırlanan çamurların Amerikan Petrol Enstitüsü Spec. 13A standardına uygun olması gerekmektedir. Bu standart gereği kullanılacak bentonitin ağırlıkla en az %96 oranında 75 µm veya daha düşük tane boyutuna sahip olması, oda sıcaklığında hazırlanan süspansiyonun (22,5 gram/350 mL deiyonize su) 600 RPM viskozimetre okumasının en az 30 θ olması, yield point ve plastik viskozite oranının (YP/PV) en fazla 3 ve filtrasyon değerinin (30 dk) en fazla 15 mL olması gerekmektedir (API, 2010).

### **Döküm Sektöründe Kullanımı**

Kolloidal ve plastisite özelliklerinden dolayı bentonitler döküm işlemlerinde kalıp kumlarında ve demir cevherlerinin peletlenmesinde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Li ve ark., 2019).

Kum ile hazırlanan kalıplarda bağlayıcı katkı malzemesi olarak %2-50 oranında bentonit kullanılmaktadır. Ancak kullanılacak bentonit oranı oldukça önemlidir. Yüksek gaz geçirgenliğine sahip poroz döküm kalıplarında düşük miktarda bentonit ile bağlayıcılık sağlanması gerekmektedir. Aksi durumda gaz ge i i azalarak döküm işleminin verimi düşmektedir (Avcı, 2009; Erdiç, 1976). Döküm sektöründe kullanılmaya uygun bentonitlerin belirlenmesinde Steel Founders Society of America (SFSA) standartları kabul görmektedir. SFSA standardına uygun bentonitlerin nem miktarı %6-12 aralığında; pH değeri 8,2; CaO miktarı ~%0,7 ve sıvı limiti 600-850 aralığında olmalıdır ( inku, 2008).

Bentonit, düşük tenörlü demir cevherlerinin peletlenmesinde yüksek plastisite özelliği, ya  mukavemetinin fazla olması ve absorpladığı suyu uzaklaştırarak yüksek kuru mukavemet sağlamasından dolayı farklı oranlarda (%0,5-0,8) kullanılmaktadır. SFSA standartlarına uygun bentonit katkılı demir peletinin ya  basma dayanımı 1-1,5 kg/cm<sup>2</sup>, 100  C kuru basma dayanımı en az 5,5 kg/cm<sup>2</sup>, 400  C kuru basma dayanımı en az 20 kg/cm<sup>2</sup>, 1000  C ve 1200  C pi me basma dayanımları sırasıyla en az 75 kg/cm<sup>2</sup> ve 200 kg/cm<sup>2</sup> olması gerekmektedir ( inku, 2008).

### **İnşaat Sektöründe Kullanımı**

Bentonit, inşaat sektöründe jelleşme, tiksotropi ve yüksek su absorplama özellikleri sebebiyle kullanılmaktadır. Genel olarak çok ince taneli (<100  m) bentonitler inşaat sektöründe tercih edilmektedir (Akbulut, 1996).

Bentonit, su i e  i me ve jelleşme özellikleri göstermesi sebebiyle baraj, gölet, tünel, heyelan  nleme yapıları, sızdırmazlık perdesi, köprü ve  stge it inşaatları ile kazı  evleri ve bina temellerinin desteklenmesinde sıvı kaçaklarını  nleme amaçlı yalıtım malzemesi (diyafram duvarı) olarak kullanılmaktadır. İnce taneli ve tiksotropisi yüksek bentonit, kum ve çakıl ile karıştırılarak sıvı geçirmeyen yalıtım malzemesi oluşturmaktadır. Ayrıca kullanılan bentonit türü de hazırlanan karışımın yalıtım özelliklerini etkilemektedir. Na-Ben ile hazırlanan karışımların sıvı geçirgenliği Na/Ca-Ben ve Ca-Ben ile hazırlananlara kıyasla daha düşüktür. Diyafram duvarı hazırlanmasında inşaatın türüne ve bölgesine göre değişiklik gösteren karışımlar hazırlanmasına rağmen genel olarak 30-40 kg bentonit, 80-350 kg  imento ve 900-950 kg su ile hazırlanan karışımlar kullanılmaktadır. Hazırlanan karışımların çökelti miktarı hacimce en fazla %4,5;



yoğunluğu ve plastik viskozitesi sırasıyla 1,03-1,25 gr/cm<sup>3</sup> ve 10-20 cP aralıklarında olmalıdır (Avcı, 2009).

### **Boya Sanayisinde Kullanımı**

Bentonitlerin renklendirici pigment ve diğer boya hammaddelerini adsorbe etmesi ve süspansiyon oluşturabilecek kadar ince taneli olması sebebiyle boya sanayisinde önemli bir katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Boya sanayisinde su ve solvent bazlı boyalarda, matbaa mürekkeplerinde, yağlı boyalarda, badana ve emayelerde katkı malzemesi olarak ince taneli bentonit kullanılmaktadır. Boyanın kullanım amacı ve türüne göre farklı tipte bentonitler katkılanmaktadır. Ancak genel bir ifade ile süspansiyon özelliklerinin iyi olması ve tiksotropik özelliğinden dolayı Na-Ben tercih edilmektedir. Na/Ca-Ben veya Ca-Ben özel amaçlı boya üretimlerinde kullanılmaktadır. Na-Ben, farklı oranlarda katkılanarak istenilen boya özellikleri elde edilmektedir. Su bazlı boya ve badanalarda gerekli viskozite değerine ulaşabilmek için ağırlıkça yaklaşık %20 oranında Na-Ben katkılanmaktadır. Yağlı boyalarda ise bu oran daha düşük olmakta ve yaklaşık %5 oranında Na-Ben katkılanmaktadır (Akbulut, 1996; Kök, 2017).

Boya sanayisinde kıvamlaştırıcı olarak organik aktivasyonlu bentonitler ham olanlara kıyasla daha fazla kullanılmaktadır. Organik aktivasyonlu bentonit (organoclay) katkılı kıvamlaştırıcılar, yaygın olarak solvent bazlı boyalarda kullanılmaktadır. Çeşitli QAT ile aktive edilen bentonitler, hidrasyon ile disperse özellik gösteren ve viskozitesi yüksek ürünler oluşturmaktadır. Ancak bu durumun aksine su bazlı boyalarda genellikle bentonit yerine lityum miktarınca zengin ve ağırlıklı olarak bor yataklarına yakın yerlerde meydana gelen hektorit minerali kullanılmaktadır (Costafreda ve Martin, 2021; Çinku, 2008).

### **Kağıt Sanayisinde Kullanımı**

Bentonit, kağıt üretimi esnasında katran, reçine ve balmumu gibi maddelerin kağıt hamurunun bir bölgesinde toplanmasını engellemek ve renk veren pigmentlerin homojen dağılımını sağlamak amacıyla düşük miktarlarda kullanılmaktadır. Bentonit katkılanması ile kağıt hamurunun kumaş, tel veya silindir gibi üretim parçalarına yapışması engellenmektedir. Ayrıca boya maddelerini de adsorplayarak kaliteli lak oluşumu sağlamaktadır (Çinku, 2008; Kök, 2017).

Bentonit, üretim makinelerine zarar vermeden dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca üretilen kağıt ürünlerine kayganlık sağlamak ve sakızımsı malzemeler ile emülsiyon oluşturarak eleklerin tıkanmasını ve kağıt hamurunda yer alan reçinelerden kaynaklı kirlenmeleri engellemektedir. Emülsiyon oluşturma, yüksek absorplama ve negatif

yüklü olmasından dolayı pozitif yüklü karbonu elektriksel olarak çekmesi ve mürekkebi uzaklaştırmasından dolayı gazete, dergi vb. eski kağıt ürünlerinin de geri dönüşümde kullanılabilmesini sağlamaktadır (Avcı, 2009;  etinel, 2008).

Kağıt sanayisinde kullanılan bentonitler saf, ince taneli, kuvars içer-meyen ve beyaz renkte olmalıdır. Ülkemizde bu sektörde kullanılmaya uygun bentonitler için Türk Standartları Enstitüsü (TSE) TS-11441 nu-maralı standardı geçerli olmaktadır. Ancak ilgili standart kapsamında yer almasa da dolgu malzemesi olarak modifiye bentonitler de kullanıla-bilmektedir. Kağıt sanayisinde kullanıma uygun bentonitlerin TS-11441 standardına göre yüksek şişme özelliği göstermesi, bulk yoğunluğunun 0,2-0,3 kg/l aralığında olması, beyaz renk derecesinin ISO 85'in üzerinde olması, montmorillonit miktarının en az %80 olması, en az %10 absorp-lama özelliği göstermesi, kademeli olarak 200  C sıcaklıkta ısıtılıp soğu-tulması ve nem miktarının en fazla %2 olması gerekmektedir (Akbulut, 1996;  inku, 2008).

### **Seramik Sektöründe Kullanımı**

Bentonit, seramik sektöründe seramik hamurunun plastiklik değerini geliştirerek kolay şekil almasında yardımcı olmaktadır. Seramik sektöründe kullanılan bentonitlerin seramik çamurunun homojen karışmasını sağlamak, kurutma esnasında meydana gelebilecek çatlamaları azaltmak ve engellemek, kuru mukavemet değerini artırmak, pişme işlemi sonrası meydana gelen kırılĖanlıĖı azaltmak gibi faydaları bulunmaktadır. Ayrı-ca, öğütme esnasında seramik sırlarına katkılanan bentonit, sırrın s s-pansiyon halinde kalmasını sağlayarak dibe çökmesini engellemektedir. Ayrıca viskozite artırıcı ve tiksotropik özellikleri nedeniyle de açılı veya dik yüzeylerde birikmelere engel olarak döküm çamurunun şekillendiril-mesini sağlamaktadır (Akbulut, 1996; Avcı, 2009).

Seramik sektöründe kullanılan bentonitler için Türk Standartla-rı Enstitüsü (TSE) TS 11136 numaralı standardı geçerli olmaktadır. Bu standarda uygun bentonitlerin bağlayıcı özelliğinin fazla olması, pişme sonrası beyaz renk alması, ağırlıkça %5 MgO katkılanarak hacimce 25 kat sulu süspansiyonunun 24 saatlik yaşlandırma süresi sonunda yapışkan koyu kıvamlı bir jel oluşturması ve pH değerinin en az 10 olması gerek-mektedir. Ayrıca esas mineralinin montmorillonit olması, 45  m gözenek çapına sahip elekten en az %98 oranında geçmesi, pişme küçülmesinin en fazla %25, nem miktarının en fazla %10, ateş kaybının en fazla %6, kim-yasal bileşimlerinde Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile TiO<sub>2</sub> miktarlarının sırasıyla en fazla %1 ve %0,3, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının ise en az %14 olması tercih edilmektedir ( inku, 2008;  inku, 1999).

## Petrol ve Doğalgaz Rafinerilerinde Kullanımı

Petrol de doğalgaz rafinerilerinde asfalt, bitüm gibi ağır petrol fraksiyonlarının piroliz ve kraking işlemlerinde bentonit önemli bir katalizör olarak kullanılmaktadır (Nagendrappa, 2011). Ağır petrol ürünlerinin kısa zincirli hafif hidrokarbonlara dönüştürülmesi süreçlerinde kullanılan bentonit, doğal hali ile yüksek verimlilikte kullanılamamaktadır. Bu sebeple verim artırmak amacıyla asit aktivasyonu uygulanarak petrol ve doğalgaz rafinerileri için uygun hale getirilmektedir. Aktivasyon işlemi uygulanacak bentonitin Ca-Ben tipi olması gerekmektedir. Uygulanacak aktivasyonun asit ile yapılmasından dolayı Na-Ben ve Na/Ca-Ben tipi bentonitlerin kataliz etkisi Ca-Ben tipine kıyasla daha düşük olmaktadır. Aktivasyon işlemi uygulanacak Ca-Ben, HCl ya da  $H_2SO_4$  ile kaynatıldıktan sonra akışkan yataklar için 20-50  $\mu m$ , hareketli yataklar için ise 1,3-3 mm tane boyutunda olacak şekilde öğütülmektedir. Isı dayanımı ve sertlik kazandırabilmek amacıyla 500-600  $^{\circ}C$  sıcaklık aralığında en az 120 dakika süre ile kalsine edilmektedir. Bu işlemler sonucunda bentonit bünyesinde yer alan demir bileşikleri yüksek oranda uzaklaştırılmaktadır. Oda sıcaklığında birkaç kez HCl ile yıkanıp deiyonize su ile durulandıktan sonra demir bileşikleri %0,15'e kadar azalmaktadır. Aktivasyonu tamamlanmış Ca-Ben, rafinasyon işlemlerinde dehidratasyon, alkilasyon ve izomerizasyon reaksiyonlarında katalizör olarak kullanılabilir. Asit aktivasyonu yapılan Ca-Ben, fenol bileşiklerinin alkilleştirilmesi süreçlerinde yer alan Friedel Crafts tepkimelerini hızlandırmakta, dehidrasyon işlemlerinde çevrimselleşmeyi sağlamakta ve izomerleşme ile polimerleşmeyi hem hızlandırır hem de artırmaktadır (Çinku, 2008; Çetinel, 2008).

## Gıda Sektöründe Kullanımı

Bentonit, gıda sektöründe genellikle un ve undan yapılan gıda ürünleri ile süt pastörizasyonunda kullanılmaktadır. Unlu gıdalarda raf ömrünü uzatmak amacıyla kullanılan bentonit, ağırlıkça %0,025-1,25 aralığında katkılanarak bayatlamayı geciktirmektedir. Ayrıca süt pastörizasyonu işlemlerinde absorplama özelliğinden dolayı kanserojen etkiye sahip Aflatoxin M1 maddesinin uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır. Ayrıca oldukça fazla seyreltik süspansiyonları hazırlanarak içilebilir bentonit üretimi yapılmaktadır. İnsan vücudunda biriken ağır metallerin atılması ve sindirim sisteminin temizlenmesi bakımından doğrudan gıda ürünü olarak da kullanılabilir (Güngör, 1981; Uz, 1990).

## Çimento Sanayisinde Kullanımı

Bentonit, çimento sektöründe hem çimento hem de beton katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Katkısız çimento olarak ifade edilen TS EN 197-1:2012 standardına uygun CEM-I tipi Portland çimentoların mekanik mukavemetinin artırılması, prizlenme ve donma sürelerinin azal-

tilmasında ağırlıkça yaklaşık %1 oranında bentonit katkılanabilmektedir ( etinel, 2008).

Bentonit katkılanarak hazırlanan betonlar ise katkısız olanlara kıyasla daha homojen yapıdadırlar. Mekanik mukavemet değerleri daha yüksek ve sıvı geçirgenlikleri daha düşüktür. Portland  imentosu, magnezyum  imentosu ve alçı karışımı ile hazırlanan harçlarda bentonit katkılanarak sıvı ve ses geçirgenliğini azaltılmaktadır. Ayrıca plastisite ve homojenlik de artırılmaktadır (Kök, 2017).

Çimento sektöründe kullanılan bentonitlerin özelliklerine ait bir standart bulunmamaktadır. Ancak genel amaçla mukavemet artırılması hedeflendiği için  ı me özelliği düşük Ca-Ben tipi bentonitler tercih edilmektedir. Na-Ben ve Na/Ca-Ben tipi bentonitler, katkılандıkları betonların kürlenme işlemlerinde Ca-Ben tipi bentonitlere kıyasla daha fazla su çekerek  ı e eği ve sonrasında bünyesindeki suyu serbest bırakacağı için mekanik dayanımı d   rmektedirler (Avcı, 2009, Yang ve ark., 2019; Costafreda ve Martin, 2021).

### **Lastik Sanayisinde Kullanımı**

Bentonit, lastik sanayisinde elektriksel olarak nötr olmasından dolayı dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca ince tane boyutuna sahip olması, sulu süspansiyonlarının jelleşme özelliği göstermesi, viskozite artırması ve dehidratasyon etkilerinden dolayı lastik sanayisinde önemli bir paya sahiptir. Viskoziteyi artırma ve kalınla tırma özelliklerinden dolayı başlıca olarak lateks ve lastik esaslı tozlar ile hazırlanan süspansiyonlarda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Kök, 2017).

Lastik sanayisinde kullanılan bentonitler için Türk Standartları Enstitüsü (TSE) TS-11442 numaralı standardı geçerli olmaktadır. Bu standarda göre kullanılacak bentonitlerin feldspat ve kuvars gibi safsızlıklardan tamamen arındırılması gerekmektedir. Ayrıca 75  m (~200 mesh) tane boyutuna sahip elekten %100 oranında geçmesi, nem miktarının en fazla %5 ve 1000  C sıcaklıktaki kızıdırma kaybının en fazla %8,5 olması gerekmektedir. Bu  zellikleri sağlayan bentonitler, hangi tip olduğu farketmek sizin lastik sektöründe kullanılabilmektedir (Akbulut, 1996).

### **Besicilik Sektöründe Kullanımı**

Bentonit, besicilik sektöründe kümes hayvanları, k   kba  ile b y  kba larda ve balıklarda yem katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. AĞırlıkça %1-1,5 oranlarında yem katkısı olarak kullanılan bentonit, tavuk ve benzer kümes hayvanlarının yumurta verimliliği ve b y  me hızlarında artış meydana getirmektedir. Kümes hayvanı cinsi ve katkı oranına bağlı olarak yumurta verimliliğini %15'e, b y  me hızını ise %35'e kadar artırabilmektedir. K   kba  ve b y  kba  hayvanlarda ise ağırlıkça

%1-1,5 aralığında katkılanan bentonit, büyüme hızlarını artırmakla birlikte hayvan dışkılarının kötü kokmasını da engellemektedir. Yem katkısı olarak kullanılan bentonit, su katkılı yemlerde yüksek miktarda bulunan amonyum ve mikotoksinlerin olumsuz etkilerini azaltıp; yemin daha uzun sürede sindirilmesini sağlayarak özümleme süresini uzatmaktadır. Bu sayede hayvanların sindirim sisteminin düzenlenmesine yardımcı olmaktadır. Balıklarda ise yüzer tip yemlerin peletlenmesinde bağlayıcı katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu sayede yem ıslandığında dağılıma meydana gelmemekte ve beslenme işlemi yapılabilmektedir (Çelik ve ark., 2003; Saeed, 1996; Güngör, 1981).

### **Gübre Sanayisinde Kullanımı**

Sulu süspansiyonlarında kolloidal özellik göstermesi ve yüksek KDK değeri ile bentonit, tarım amaçlı toprak gübrenmesinde önemli katkı malzemeleri arasında yer almaktadır. Bentonit katkılı gübre ile tarım amaçlı yetiştirilen bitki ve ağaçların büyüme ve gelişmesi için gerekli olan nem uzun süreli olarak sağlanabilmektedir. Doğal ve yapay gübrelerde bulunan ve toprakta çözünebilen tuzların ortamdan daha yavaş uzaklaşması bentonitin bu tuzları absorplayabilmesi ile engellenmektedir. Bentonit katkılı gübreler ile bitki ve ağaçlarda daha az ve kontrollü sulama yapılması sağlanabilmektedir. Ayrıca süspansiyon veya çözelti halindeki gübrelerde bentonit, stabilize edici katkı malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Gübre sanayisinde kullanıma uygun bentonitleri tanımlayabilmek için bir standart bulunmamasına rağmen su tutma ve nemlendirme ihtiyacından dolayı Na-Ben tipi bentonitler diğer iki tip (Na/Ca-Ben ve Ca-Ben) bentonite göre daha fazla tercih edilmektedir (Çinku, 2008; Avcı, 2009; Kök, 2017).

### **İlaç ve Kozmetik Sektörlerinde Kullanımı**

Bentonitler, ilaç ve kozmetik sektörlerinin birçok alanında kullanılmaktadır. Alkali özellik gösteren bentonitler, merhemlerde dolgu malzemesi ve ağır etkili ilaçların hafifletilmesinde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. X-Ray ışınları ile röntgen çekimlerinde kullanılan  $BaSO_4$  süspansiyonunun homojen halde tutulmasını sağlayan temel katkı malzemesidir. Ayrıca, ilaç yapımında kullanılan reçinemsı yapışkan hammadde-lerin kolay öğütülmesi amacıyla katkılanmaktadır (Çinku, 2008).

Bentonit, ilaç sektöründe yalnızca insan sağlığı amacıyla kullanılmamaktadır. İlaçlı hayvan banyolarının hazırlanmasında süspansiyonun homojen olması amacıyla dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. İlaçlı hayvan banyoları ile tedavilerde ilaç aktif maddelerinin süspansiyon stabilizelerini koruyarak kaplama ve yapışma özelliklerini artırmaktadır. Elektriksel yük bakımından nötr olması sebebiyle ilaç aktif maddeleri ile reaksiyona girmeyerek toksik etkinin azalmasını sağlamaktadırlar. Ayırı-

ca; pyrethrum, rotenone ve nikotin sülfat gibi ileri seviye toksik maddelerin uzaklaştırılması için hazırlanan ilaçlarda süspansiyon stabilitesini korumak için bentonit katkılanması yapılmaktadır. Mantar tedavilerinde ise kükürt-bentonit katkılı kolloidal özellik gösteren ilaçlar kullanılmaktadır (Avcı, 2009).

Bentonitlerin sulu süspansiyonları veya nemlendirilmiş hamurları yüksek plastik ve kolloidal özellik gösterdiği için vücut yüzeyinden tuz, nem ve zehirli maddelerin uzaklaştırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu sayede vücut derisindeki göz ile görülmeyen gözenekler açılıp temizlenmektedir. Bu sebeple bentonit, kozmetik sektöründe cilt bakımı ve temizliği açısından önemli yere sahiptir ( etinel, 2008).

İlaç ve kozmetik sektörlerinde kullanılan bentonitler için Türk Standartları Enstitüsü (TSE) TS-10252 numaralı ve United States Pharmacopeia (USP) XIX numaralı standartları geçerli olmaktadır. Bu standartlara uygun bentonitlerin suda     nmemesi, sulu süspansiyonlarının pH değerinin 9,5-10,5 aralığında olması, nem miktarının %5-8 aralığında olması, yaş elek analizinde 75  m (~200 mesh) gözenek çaplı elekten tamamen geçmesi, 2 gr/100mL olarak hazırlanan süspansiyon hacminin en az 24 mL olması ve 6 gr bentonit ile 300 mg MgO karışımının 100 mL deiyonize suda en az 98 mL hacime sahip olması gerekmektedir ( inku, 2008; Akbulut, 1996).

### **Atık Yönetiminde Kullanımı**

Bentonitler, atık yönetimlerinde suların temizlenmesi ve sızdırmazlık sağlanması amaçları ile kullanılmaktadır. Atık depolama sahaları ve barajlarında zemin astarı (dolgu malzemesi) olarak bentonit yer almaktadır. Atık barajlarında ise sızdırmazlığın sağlanması ve korunabilmesi amacıyla bentonit kullanılmaktadır (Garcia ve ark., 2006; Avcı, 2009).

Atık yönetim sistemlerinde amaca bağlı olarak değişen farklı tiplerde bentonitler kullanılmaktadır. Zemin astarı olarak kullanılacağı durumlarda şişme oranının düşük olması ve su tutma  zelliliğinin az olması gerektiği için Ca-Ben tipi bentonitler tercih edilmektedir. Ancak bazı durumlarda da Na/Ca-Ben tipi bentonitler de kullanılmaktadır. Nükleer atık depoları veya kapsülleri gibi sızdırmazlığın amaçlandığı durumlarda ise hem yüksek su tutma kabiliyeti hem de yüksek adsorplama yeteneğinden ( zellikle radyon kleitler) dolayı Na-Ben tipi bentonitler diğer tiplere kıyasla daha fazla tercih edilmektedir. Jeotekstil  r nlerinin imalatında ise sızdırmazlık sağlamak amacıyla Na-Ben ve Na/Ca-Ben tipi bentonitler kullanılabilir (Garcia ve ark., 2006; Molera ve Eriksen, 2002;  inku, 2008).

### **Absorban Olarak Kullanımı**

Yüksek absorban özellikleri sebebiyle kil mineralleri kedi kumu olarak kullanılabilir. Kullanım amacına bağlı olarak yüksek ve düşük

yoğunluklu killeri olarak ikiye ayrılmaktadır. Yüksek yoğunluklu kil ihtiyacında bentonit, düşük yoğunluklu kil ihtiyacı durumunda ise sepiyolit ve atapulgit mineralleri kullanılmaktadır. Ancak, kedi kumu pazarının yaklaşık %75 gibi bir kısmı düşük yoğunluklu killerden oluşmaktadır. Bentonit ise ancak %25 kadar pazar payına sahip olmaktadır (Demirel, 1995; Santaren, 1993; Guearra ve ark., 2013).

Absorban olarak kullanılan bentonitlerin kalite sınıflandırması ile ilgili bir standart bulunmamaktadır. Ancak absorpsiyon kapasitesi yüksek, tane boyutu 1-6 mm aralığında ve Ca-Ben tipi olanlar daha fazla tercih edilmektedir (Avcı, 2009).

### **Berraklaştırma İşlemlerinde Kullanımı**

Bentonit, meyve suyu ve alkol ürünleri gibi sıvıların berraklaştırılmasında kullanılabilir. Bu sıvıların içerisinde hidrate olup elektiriksel olarak negatif yüklenen tanecikleri ile posa ve tortu gibi bulanıklığa sebep olan maddeler ile floküle olarak uzaklaştırılmasını sağlamaktadır (Akbulut, 1996; Kök, 2017).

Berraklaştırma işlemlerinde kullanılan bentonitlerin kalite sınıflandırması ile ilgili bir standart bulunmamaktadır. Ancak şişme özelliği düşük, kimyasal bileşiminde Fe bileşikler az ve değişebilen katyon olarak Na içermeyen bentonitler tercih edilmektedir. Dolayısıyla Ca-Ben tipi bentonitlerin kullanımı Na-Ben ve Na/Ca-Ben tipi bentonitlere kıyasla daha uygundur (Avcı, 2009).

### **Ağartma İşlemlerinde Kullanımı**

Bentonit, çeşitli aktivasyon işlemleri sonrasında yağların renk giderme işlemlerinde ağartma toprağı olarak kullanılmaktadır. Ayçiçek, kanola, mısır ve soya gibi bitkisel yağların ağartılma işlemlerinde klorofil, ksantofil, gosipol ile alfa ve beta karoten gibi renk veren pigmentlerin absorbe edilmesinde bentonit kullanılmaktadır. Ayrıca yağların uygun olmayan üretim ve depolama işlemleri sonrası oksidatif etkisiyle meydana gelen polikenatik ve hidroksi asitlerin absorplanarak uzaklaştırılmasında da bentonit kullanılmaktadır (Çinku, 2008).

Bitkisel yağlar içerisinde fosfatlar, ağır metaller, sakızımsı maddeler ve serbest yağ asitleri gibi safsızlıklar rafinasyon işlemleri sonucu giderilmektedir. Rafinasyon işlemleri sonucu yağlar ağırlıkça %0,3-1,5 aralığında bentonit ile karıştırılarak 30 dakika süre ile 90-95 °C sıcaklık aralığında vakum ile yeniden rafinasyon işlemine maruz bırakılmaktadır. Ağartma toprağı olarak kullanılan bentonitler, yağ sanayisinde renk pigmentlerinin absorbe edilmesi, filtrasyon sürecinin hızlandırılması, ağır metallerin yağ içerisinden uzaklaştırılması, serbest yağ asitlerinin azaltılması, oksidasyon ürünlerinin yağ içerisinden uzaklaştırılması ve yağın



peroksit değerinin düşürülmesinde önemli rol oynamaktadır ( akıcıoğlu ve ark., 1985; Avcı, 2009).

Bentonit, ağartma toprağı olarak kullanılmış yağların geri dönüşümünde de kullanılmaktadır. Kullanım sonrası özelliğini yitirmiş ve rengi bozulan mineral yağlarına ağırlıkça %3-8 aralığında bentonit katkılanması ile 300-350  C sıcaklık aralığında vakum altında ağartma işlemi uygulanmaktadır. AĞartma işlemi sonrası yüksek oranda eski rengine dönen mineral yağları, ilave katkı malzemeleri ile kullanılacağı alana uygun viskozite ve yağlama özelliklerine sahip olmaktadır ( elik ve ark., 2003; Sarıkaya ve ark., 2001;  inku, 2008).

Yağ endüstrisinde ağartma toprağı olarak kullanıma uygun doğal bentonitler çok nadir bulunmaktadır. Dolayısıyla aktifleştirme işlemi uygulanan bentonitler ile daha uygun hale getirilmektedir. Aktifleştirme işleminde ise asit aktivasyonu uygulanmaktadır. Asit aktivasyonu için ise şişme özelliği düşük ve oktahedral tabakasında  $Al^{+3}$  katyonu ile yer değiştiren  $Mg^{+2}$  katyonlu Ca-Ben tipi bentonitler kullanılmaktadır. Na-Ben ve Na/Ca-Ben tipi bentonitlerin hem asit aktivasyonunda hem de ağartma toprağı olarak yağ sanayisinde kullanılması mümkün olmamaktadır. Yağ sanayisinde ağartma işlemlerinde kullanılan bentonitlerin kalite sınıflandırması ile ilgili bir standart bulunmamaktadır. Ancak genel olarak nem miktarının en fazla %1 ve 100 gram bentonitin asidite tayininde en fazla 0,04 mL hacminde 1N NaOH kullanılan bentonitler tercih edilmektedir ( inku, 2008; Vatansever, 2009).

### **Yangın S nd r c lerde Kullanımı**

Bentonit, kil mineralleri arasında en yüksek su tutma özelliği ile öne çıkmaktadır. Kendi içinde ise su tutma kapasitesine göre sırasıyla Na-Ben, Na/Ca-Ben ve Ca-Ben olarak sıralanmaktadır. Yangın söndürücülerde yüksek su tutabilme özelliğinden dolayı Na-Ben tipi bentonitler kullanılmaktadır. Genellikle orman yangınları olmak üzere konut ve fabrika yangınlarında sulu süspansiyon olarak hazırlanmış Na-Ben, yangın alanına püskürtülerek hava temasını kesmektedir. Bu sayede, yangın daha kolay ve kısa sürede kontrol altına alınarak s nd r lmektedir ( inku, 2008; Avcı, 2009).

### **Nem Alıcı (Desikant) Olarak Kullanımı**

Bentonitlerin çeşitli yöntemler ile modifikasyonu sonrasında nem absorplama ve adsorplama özellikleri gelişmektedir. Bu sayede desikant olarak kullanılabilir. Elektrik devreleri, askeri ekipmanlar, motor ve makine parçaları, ilaç ve tıbbi malzemeler, deri ürünleri, spor malzemeleri ve elektronik eşyalar gibi nem hassasiyeti bulunan malzemelerin nakliye ve depolanmasında bentonitler kullanılmaktadır (Avcı, 2009).



Desikant olarak kullanılacak bentonitlerin modifikasyon işleminden geçmesi gerekmektedir. Modifikasyon işlemlerinde bentonit  $MgSO_4$ ,  $CaSO_4$ ,  $MgCl_2$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $NaCl$ ,  $CaCl$ ,  $LiCl$ ,  $CaCl_2$ , aktif alümina ve odun talaşı gibi çeşitli nem tutucu bileşikler ve maddeler ile aktive edilmektedir (Chimeddorj, 2007; Kök, 2017).

Nem alıcı desikant olarak kullanılan bentonitlerin kalite sınıflandırması ile ilgili bir standart bulunmamaktadır. Ancak Na-Ben ve Na/Ca-Ben tipi bentonitlere kıyasla daha yüksek nem alma özelliği gösteren ve kimyasal bileşiminde en az %5 oranında  $MgO$  içeren Ca-Ben tipi bentonitler tercih edilmektedir (Grim, 1968; Kendall, 1996).

### **Sabun ve Temizlik Ürünlerinde Kullanımı**

Bentonitler, yağları yüksek oranda absorbe edebildikleri için vücut ve kumaş temizliğinde kullanılabilir. Ayrıca, sabun imalatında yüzey gerilimini artırarak daha iyi köpürmesini ve dağılmasını sağlamaktadır. Yağların cilt ve kumaş yüzeylerinden sökülmesi ve uzaklaştırılmasını sağlayan bentonit, kirleri de absorbe ederek temizlenmesine yardımcı olmaktadır. Sulu süspansiyonlarda kolloidal özellik göstermesi ve elektriksel olarak negatif yüklü olması, yüksek yağ absorpsiyon ve katyon değişim kabiliyetlerinden dolayı bentonit, sabun ve temizlik ürünlerinde önemli bir katkı malzemesi olarak tanımlanmaktadır. Emülsiyon oluşturma, yağ asitlerini çözme ve uzaklaştırma ile karbon taneciklerini adsorbe etme özellikleri ile hem sabun hem de deterjan imalatında rol oynamaktadır (Avcı, 2009).

Sabun ve temizlik ürünlerinde kullanılan bentonitler için Türk Standartları Enstitüsü (TSE) TS-11326 numaralı standart geçerli olmaktadır. Bu standarda uygun bentonitlerin beyaz renkli ve viskozite artırıcı özellik göstermesi gerekmektedir. Ayrıca,  $125 \mu m$  (~120 mesh) gözenek çapına sahip elekten ağırlıkça en az %98 oranında ve  $62 \mu m$  (~240 mesh) elekten ise ağırlıkça en az %90 oranında geçmesi gerekmektedir.  $100^\circ C$  sıcaklığındaki ağırlık kaybının (nem) en fazla %15, sıkıştırılmış yoğunluğunun en az  $0,85 g/cm^3$  ve ağırlıkça %24 oranında hazırlanan sulu süspansiyonunun pH değerinin 8-9 olması gerekmektedir (Çinku, 2008).

## KAYNAKÇA

- Akbulut, A., 1996. Bentonit. MTA eğitim serisi no:32, Ankara.
- API Spec 13A Standart, 2010. Specification for Drilling Fluids Materials. Washington, 20005.
- Avcı, S.B., 2009. Soda ve MgO ile Aktiflendirilmiş Aratip Bentonitlerin Sondaj ve Döküm Bentoniti Karakteristiklerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Bloodworth A.J., Highley D.E., Inglethorpe, S.D., and Morgen D.J., 1993. Industrial Minerals Laboratory Manual Bentonite. British Geological Survey.
- Chimeddorj, M., 2007. Farklı Bentonitlerin Nem Alıcı (Desikant) Özelliklerinin Belirlenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Costafreda, J. L., and Martín, D. A., 2021. Bentonites in Southern Spain: Characterization and Applications. Crystals, 11(6), 706.
- Çakıcıoğlu, F., B ke, N., Uma , S. ve Peker, S., 1985. Kilin Kuru Yöntemle Asit Aktivasyonuna Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. II. Ulusal Kil Sempozyumu, Ankara.
-  elik, K., Denli, M., ve Ersoy, İ.E., 2003. Yem Mikotoksinleriyle Savaşımda Killerin ve Değişik Adsorbanların Kullanımı. XI. Ulusal Kil Sempozyumu, İzmir.
-  etinel T., 2008. Ara ve Ca Bentonitlerin Soda ve MgO ile Aktivasyonu. Dumlupınar Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- Çinku K., 2008. Aktivasyon Yöntemleri ile Bentonitten Su Bazlı Kıvamlaştırıcı Üretiminin Araştırılması. İstanbul Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul.
- Çinku, K., 1999. Yazır (Trakya) Bentonitinin Boya Sanayinde Kıvamlaştırıcı Olarak Kullanılmak Üzere Hazırlanması Olanaklarının Araştırılması. İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Demirel, H., 1995. Bentonit ve Diğer Killerin Absorbant Olarak Kullanımı. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Dumlupınar, İ., 2008. Kapıkaya (Eskişehir) Bentonit Oluşumlarının Jeolojik, Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.
- Erdoğan, S.Ş., 1976. Bentonitlerin Metalurjik Uygulamaları Yönünden Araştırılması ve Reşadiye Bentonitlerinin Bu Açıdan İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul.
- Erdogan, Y., Demir, M.H., Kök, O.E., 2021. Investigation and Prediction of Viscosity of Spud Type Drilling Muds Added Barite, Calcium Carbonate and Olivine by Artificial Neural Networks with Limiting Data. Fresenius Environmental Bulletin, 30(2A), 2169-2179.
- Erdogan, Y., Kök, O.E., 2019a. Usage of Olivine as Additive Material in Wa-

- ter-Based Drilling Muds. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(7), 5559-5568.
- Erdoğan, Y., Kök, O. E., Tanrıverdi, İ., 2017b. Çanakkale Tuzla Jeotermal Sondaj Sahası Çamur Maliyetinin Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 11-20 .
- Erdoğan, Y., Kök, O. E., 2020. Flow Characteristics Of Eldivan-Çankırı (Turkey) Bentonites Compared to Wyoming (USA) in Drilling Muds: An Experimental Approach. *Architecture Sciences*, 91.
- Erdoğan, Y., Kök, O. E., Tanrıverdi, İ., 2017a. Atık İskenderun Siyah Mermer (Alexandrette Black) Tozunun Sondaj Çamurlarında  $\text{CaCO}_3$  Olarak Kullanımı, 2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress, Adana, Turkey.
- Erdoğan, Y., Kök, O.E., 2019b. Production and Characterization of Nanobentonite from Sodium Bentonite with Mechanical Grinding. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(11), 8141-8150.
- Garcia, S.G., Jonsson, M., and Wold, S., 2006. Temperature Effect on the Stability of Bentonite Colloids in Water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 298, 694-705.
- Grim, R.E., 1968. *Clay Minerology*: 2. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Guerra, D. J. L., Mello, I., Resende, R., and Silva, R., 2013. Application as Absorbents of Natural and Functionalized Brazilian Bentonite in  $\text{Pb}^{2+}$  Adsorption: Equilibrium, Kinetic, pH, and Thermodynamic Effects. *Water Resources and Industry*, 4, 32-50.
- Güngör, N. 1981 Bentonitik Kil Minerallerinin Yapı ve Özellikleri Üzerine Değişen Katyonların Etkilerinin Fiziksel Yöntemlerle İncelenmesi. İstanbul Üniversitesi, Doktora tezi, İstanbul.
- Karagüzel C., Çetinel T., Boylu F., Çinku K., and Çelik M.S., 2010. Activation of (Na, Ca) Bentonites with Soda, MgO and Their Utilization as Drilling Mud. *Applied Clay Science*, 48, 398-404.
- Kendall, J., 1996. Desiccant clay. *Industrial Minerals*.
- Kozak, M., Domka, L. and Skrzypczak, A., 2002. Adsorption of the Quaternary Ammonium Salts on Bentonite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 36, 299-306.
- Kök, O. E. , Tanrıverdi, İ., Erdoğan, Y., 2018. Usage of Vermiculite as Additive Material in Water-Based Drilling Muds. *Natural and Engineering Sciences*, 3(2), 179-186
- Kök, O.E., 2017. Nanobentonit Eldesi ve Karakterizasyonu. İskenderun Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
- Köster, M. H., Williams, L. B., Kudejova, P., and Gilg, H. A., 2019. The Boron Isotope Geochemistry of Smectites from Sodium, Magnesium and Calcium Bentonite Deposits. *Chemical Geology*, 510, 166-187.

- Li, H. F., Chen, M. Q., Fu, B. A., and Liang, B., 2019. Evaluation on the Thermal and Moisture Diffusion Behavior of Sand/Bentonite. *Applied Thermal Engineering*, 151, 55-65.
- Mingelgrin, U., Kliger, L., Gal, M. and Saltzman, S., 1978. The Effect of Grinding on the Structure and Behaviour of Bentonites. *Clays and Clay Minerals*, 26, 299-307.
- Molera, M., and Eriksen, T., 2002. Diffusion of  $^{22}\text{Na}^+$ ,  $^{85}\text{Sr}^{2+}$ ,  $^{134}\text{Cs}^+$  and  $^{57}\text{Co}^{2+}$  in Bentonite Clay Compacted to Different Densities: Experiments and Modeling. *Radiochimica Acta*, 90(9-11), 753-760.
- Nagendrappa, G., 2011. Organic Synthesis Using Clay and Clay-Supported Catalysts. *Applied Clay Science*, 53(2), 106-138.
-   zdemir, A. ve   zcan, E., 2007. Bentonitin Sondaj M  hendisliği   zellikleri. *Jeofizik B  lteni*, 54, 352-357
- Saeed, A., 1996. Bentonite in Animal Feed, a Living Mineral. *Industrial Minerals*, 346, 47-51.
- Santaren, J., 1993. European Market Developments for Absorbent Clays. *Industrial Minerals*, 393, 35-50.
- Sarıkaya, Y.,   nal, M., Alemdaroğlu, T., ve Noyan, H., 2001. Bir Bentonitin Katyon Değiştirme Kapasitesi ile şişmesi Arasındaki İlişki. 10. Ulusal Kil Sempozyumu, Konya.
- Savage, D., Walker, C., Arthur, R., Rochelle, C., Oda, C., and Takase, H., 2007. Alteration of Bentonite by Hyperalkaline Fluids: A Review of The Role of Secondary Minerals. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(1-7), 287-297.
- T  ys  z, E., 2016.   ankırı-Eldivan Y  resi Bentonitinin D  k  m Kalıp Kumu   zelliklerine Etkisinin İncelenmesi. İstanb  l Teknik   niversitesi, Y  ksek Lisans Tezi, İstanb  l.
- Uz, B., 1990. Bentonit, Mineraller, Kristalografi. *Mineraloji*, 413-415.
- Vatansever, A., 2009. Reşadiye Bentonitinden Organofilik Bentonit Sentezi. İstanb  l Teknik   niversitesi, Y  ksek Lisans Tezi, İstanb  l.
- Yang, H., Long, D., Zhenyu, L., Yuanjin, H., Tao, Y., Xin, H., and Shuzhen, L., 2019. Effects of Bentonite on Pore Structure and Permeability of Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, 224, 276-283.

## Bölüm 7

### DESENLİ DİSK İLE HIZLI KATILAŞTIRILMIŞ AL-7075 ALAŞIMLARININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

***M. Fatih KILIÇASLAN<sup>1</sup>, Ümit YILMAZ<sup>2</sup>,  
Bekir AKGÜL<sup>3</sup>, Yasin YILMAZ<sup>4</sup>***

---

1 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8507-390>

2 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8922-2387>

3 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4744-9097>

4 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0690-8004>

## 1. GİRİŞ

Al-7075 serisi alaşımlar özellikle havacılık ve savunma endüstrisinde üstün mekanik özelliklerinden dolayı sıklıkla tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımları doğası gereği hafif bir metal (yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) olduğu için uçan araçlarda vazgeçilmez bir konumdadır. Al-7075 serisi alaşımların mekanik özelliklerinin daha fazla geliştirilmesi için çökelme sertleşmesi ve buna bağlı ısıtılma işlem sıcaklığı ve süresi üzerine çeşitli çalışmaları bulmak mümkündür (Durman & Murphy, 1991; Emami et al., 2009; Luo et al., 2020; Wang et al., 2021). Al-7075 alaşımına farklı tane inceltici veya arayer/yer alan atomu görevi görebilecek alaşım elementleri ilave ederek yine mekanik özellikler geliştirilmeye çalışılmıştır (Akinribide et al., 2022; Leng et al., 2021; Yang et al., 2020). Fakat literatür detay bir şekilde incelendiğinde bu tür alaşım elementi ilave edilen çalışmaların birçoğunda bazı mekanik özellikler artarken bazı mekanik veya fiziksel özelliklerin doğal olarak kafes yapısı çarpıldığı için zarar gördüğü bilinmektedir. Öte yandan çekme mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özellikleri geliştirmenin bir diğer yolu ise deformasyon sertleştirmesidir (Li et al., 2009; Rajamuthamilselvan & Ramanathan, 2011; Shojaei et al., 2016). Sıcak, ılık veya soğuk yapılabilen haddeleme ve dövme gibi deformasyon işlemleri sayesinde dislokasyon ve kalıntı gerilim yoğunlukları artırılarak yapı içinde kafeslerin esneklikleri sınırlandırılabilir. Ayrıca kaymayı kolaylaştıran dislokasyon hareketleri, yapı içinde oluşturulan dislokasyon yoğunluklarıyla engellenerek bu bölgede önemli bir direnç sağlanmaktadır (Akgül et al., 2023; Verhoeven, 1991). Benzer bir yaklaşım, kalıntı gerilimler ile dislokasyonların etkileşimi içinde söylenebilir. Fakat mikro yapıdaki bu aşırı kalıntı gerilimler malzemelerin stabilizasyonu için istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden çoğu zaman stres giderme ısıtılma işlemi uygulanır. Bu ısıtılma işlemi sayesinde kalıntı gerilimler giderilirken sıcaklığın etkisinde hareketliliği artan atomlar kısa mesafeli difüzyon hareketi ile tanelerin irileşmesini sağlarlar. Burada söz konusu sürücü kuvvet, tanelerin sahip olduğu enerjidir ve atomlar yüksek enerjili küçük tanelerden düşük enerjili iri tanelere hareket eder ve yapı genelinde minimum enerji eğilimindedirler. Ayrıca deformasyon sonrası mikro yapıda meydana gelen bir diğer mekanizma; tane boyutunun kırılarak, ikizlenerek veya yeniden kristalleşerek küçülmesidir. Bilindiği gibi, malzemelere herhangi bir kuvvet uygulandığında bu kuvvet doğrultusunda veya kuvvete dik doğrultularda dislokasyonlar kaymaya başlarlar ve önüne tane sınırı gibi bir engel çıkmadıkça yeterince süneklilik sağlayabilir. Fakat deformasyon işlemi ile tane boyutunun küçültülmesi sayesinde tane sınırlarında da ciddi bir artış sağlanmıştır. Bu tane sınırları dislokasyon hareketlerini kısıtlayan en önemli engellerden biridir. Hall-Petch yasasına dayanan tane sınırı dayanım artış mekanizması aslında metallerin şekillendirildiği en

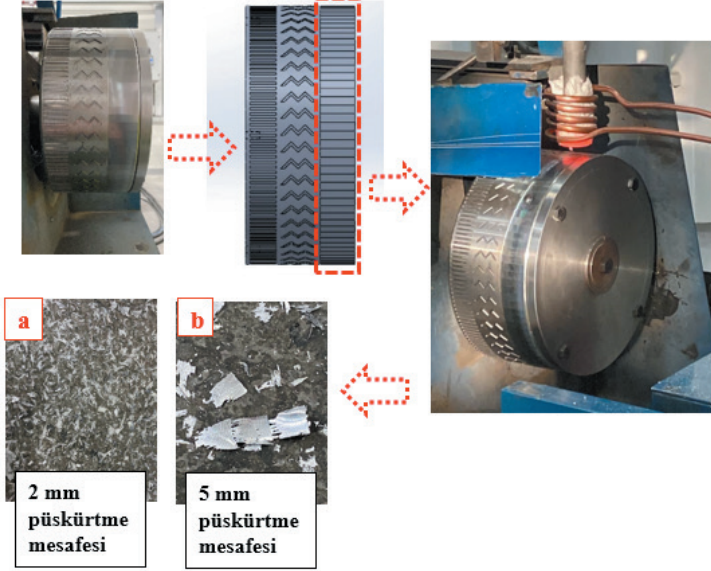
eski çağlara kadar dayanmaktadır. Fakat Hall-Petch yasasının tane boyutu ile ilişkisi incelendiğinde, tane sınırı dayanım artışı mekanizmasının etkin bir şekilde çalışabilmesi için tane boyutunun 5 mikronun altında olması gerekmektedir (Akgul et al., 2023; Balasubramanian & Langdon, 2016; Hansen, 2004; Kul et al., 2021, 2023). Bu sayede beklenen dayanım artışı gözlenebilir. 1960 yılında Duwez ve arkadaşlarının yaptıkları bir deneyde, bakır bir levha üzerine damlayan damlacığı incelediklerinde metalin beklenen şekilde kristalize olmadığı gözlemlenmiştir (Duwez et al., 1960; Klement et al., 1960). Bu çalışmadan sonra hızlı katılaşma alanında detaylı araştırmalar yürütülmüştür. Hızlı katılaştırma tekniği metallerde olağanüstü özellikler kazandırmasıyla ilgi çekici bir teknik olarak görülmektedir. Hızlı katılaştırma sayesinde; katı çözünürlük sınırları genişlemekte, yeni meta-stabil fazlar oluşabilmekte, yavaş soğumadan kaynaklı segregasyonlar minimize edilmekte ve son derece ince tane yapısı elde edilebilmektedir (Kilicaslan et al., 2021; Kılıçaslan et al., 2021, 2022). Hatta soğuma hızının belirli bir sınırı geçmesiyle metalik camların (amorf) üretimine dahi imkân sağlanabilmektedir. 1960 yılından bu yana birçok farklı hızlı katılaştırma tekniği geliştirilmiştir. Bunlar arasında en yaygın kullanılan ve seri üretime de uygun olan eriyik eğirme tekniği, yaklaşık  $10^7$  °C/s soğuma hızıyla olağan üstü sonuçlar verebilmektedir (Szymanek et al., 2014; Tkatch et al., 2002).

Bu kapsamda Al-7075 serisi alaşımın mekanik özelliklerini herhangi bir alaşım elementi eklemeksizin eriyik eğirme tekniği ile hızlı katılaştırılması yapılmıştır. Bilindiği gibi hızlı katılaştırma prosesi; hızla dönen bakır bir diskin üzerine sıvı metalin çok yakın bir mesafeden uygun bir argon basıncı ile püskürtülmesini kapsamaktadır. Kısaca tanımlanan eriyik eğirme işlemi sonucunda hızlı katılaşmış ve mikron altı tane boyutlarına sahip alaşımların üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Fakat alüminyum alaşımları gibi genellikle sünek karakteristiğe sahip alaşımların şeritleri de sünek olmaktadır. Bu yüzden sünek şeritlerin ufalanarak toz haline getirilmesi günümüzde kullanılan geleneksel bilyeli değirmenler ile oldukça zordur. Çünkü bu şeritlerin nihai kullanıcıya sunulabilmesi için preslenerek bulk formuna getirilmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak geliştirilen desenli diskler sayesinde bu sorunun üstesinden gelinmiş ve yaklaşık 50 mikron kalınlığında ve 5 mm uzunluklarında Al-7075 şerit kırpıntıları rahatlıkla üretilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Hızlı katılaştırma yöntemlerinden bir tanesi olan, eriyik eğirme yönteminde Al-7075 serisi alaşım malzemelerinin, desenli disk ve farklı püskürtme mesafesinin etkisi mikrosertlik ve mikroyapıda meydana getirdiği değişimler mekanik özelliklerin tespiti için analiz edilmiştir. Hızlı katılaştırma prosesinde kullanılan deneysel düzenek Şekil 1'de verilmiştir.

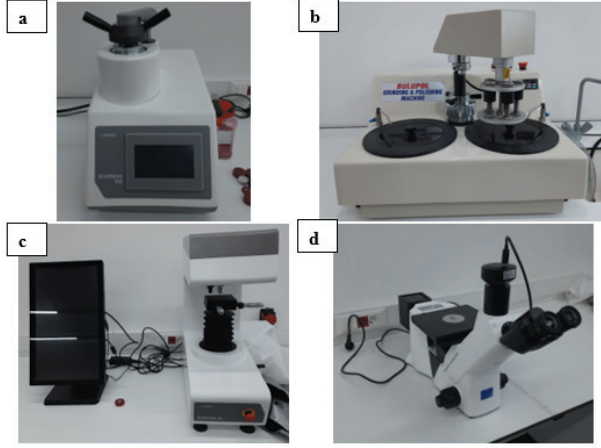
Eriyik eğirme yönteminde, eriyik metal yüksek hızda (yaklaşık 35 m/s) dönen desenli metal disk üzerine iki farklı mesafeden püskürtülmüştür. Deneysel çalışmamızda eriyik alüminyum alaşımı Şekil 1’de desenli disk üzerinde kırmızı kesikli çizgi ile gösterilen bölümü üzerine 5 ve 2 mm mesafeden püskürtülmesi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 1.** Çalışmalarda kullanılan deneysel düzenek ve farklı püskürtme mesafelerinde elde edilen ürünler a) 2 mm b) 5 mm

Desenli disk kullanılarak gerçekleştirilen eriyik eğirme yöntemi kullanılarak üretilen numunelerin metalografik testleri Şekil 2’de verilen cihazlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop görüntülerini almak için bakalite alınan numuneler 200 – 400 – 600 – 800 – 1200 numaralı zımparalar ile zımparalanmış ve 2 mikronluk elmas pasta yardımı ile parlatılmıştır. Tane sınırlarını belirgin bir şekilde görebilmek için bütün numuneler Keller dağlama ayıracı ile 20 saniye süreyle dağlanmışır. Bilindiği gibi Keller dağlama ayıracı %96.22 saf su, %2.59 Nitrik asit, %0.64 hidroklorik asit ve %0.55 hidroflorik asit’den oluşmaktadır.



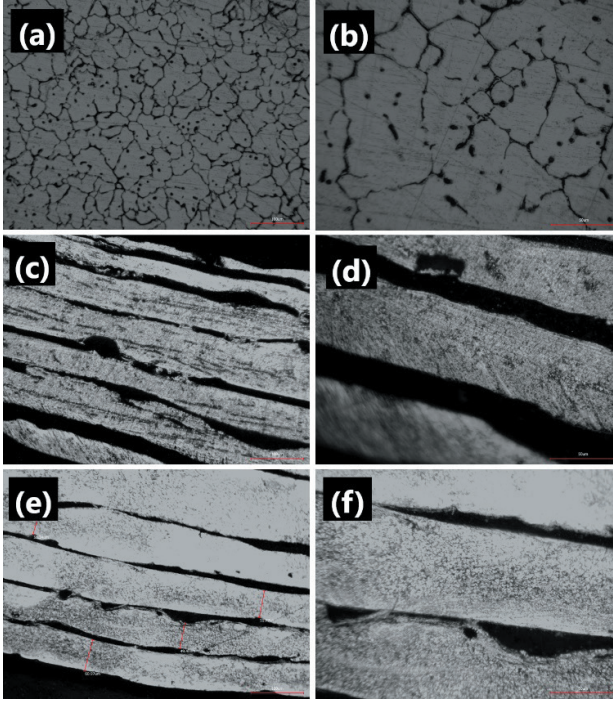


**Şekil 2.** Metalografik testlerde kullanılan cihazlar a) METKON ECOPRESS 102 Bakalite Alma Cihazı b) BULUT / BULUPOL Zımparalama / Parlatma Cihazı c) METKON DUROLİNE – M Mikroserilik Cihazı d) SOIF Optik Mikroskop

### 3. BULGULAR

Şekil 1’de 2 ve 5 mm mesafeden püskürtülmüş alüminum şeritleri görülmektedir. Püskürtme mesafesinin azalmasına paralel olarak şerit kalınlığının da değiştiği görülmektedir. Şerit kalınlığının değişimi ısı transferini de etkileyeceği için soğuma hızı da doğrudan etkilenmektedir (Kilicaslan vd. 2021). Şerit kalınlığının azalması ile soğuma hızının ciddi bir miktarda artmış ve buna bağlı olarak tane boyutu olağan üstü azalmıştır. Tane boyutunun azalması, mekanik özelliklerin gelişimine esasen katkı sağlayan tane sınırlarının yoğunlaşması anlamına gelmektedir. Buda Hall-Petch kanunu olarak bilinen ve aslında tane sınırı dayanım artırma mekanizmasını aktifleştirmektedir (Akgul vd., 2023). Hall-Petch kanuna göre tane boyutu ile mekanik özellikler arasında ciddi bir bağıntı bulunmaktadır. Fakat tane boyutunun mekanik özelliklere olan etkisi tane boyutunun ancak 5 mikronun altına indiğinde derin bir şekilde hissedilmektedir. Bu yüzden Şekil 3’te optik mikroskop ile üretilen numunelerin görüntüleri alınmış ve ASTM E112-13 standartlarına uygun olarak ortalama tane boyutu hesaplanmıştır. Fakat eriyik eğirme ile üretilen numunelerin tane boyutları çok küçük olduğu için en büyük büyütme oranında elde edilen optik mikroskop görüntülerinde gözlemlenebilen tane boyutlarının manuel ölçümü yapılarak tane boyutu sonuçları elde edilmiştir. Şekil 3 (a ve b)’de görüldüğü gibi geleneksel pirometalurjik yöntemlerle üretilmiş döküm ingotunun ortalama tane boyutu 50 mikron olarak ölçülmüştür. Öte yandan 5 mm mesafeden üretilmiş şerit numunenin tane boyutları yapılan manuel ölçümler sonucu ~1 mikron iken 2 mm mesafeden üretilen şerit numunede mikron altında olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak optik

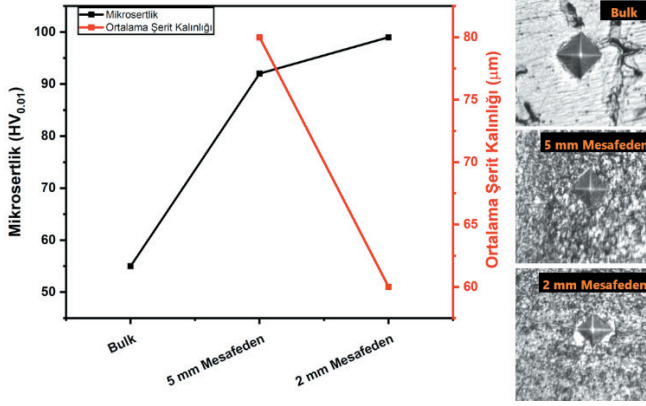
mikroskopta alınan maksimum büyüttmelerde dahi Şekil 3 (d ve f)'de görüldüğü gibi net bir tane yapısı görülememektedir. O yüzden mikron altı olarak değerlendirilmiştir.



**Şekil 3.** Numunelerin farklı büyüttmelerdeki optik mikroskop görüntüleri; (a,b) Geleneksel pirometalürjik yöntemlerle üretilmiş döküm ingot numunesi, (c,d) 5 mm mesafeden püskürtülmüş şerit numunelerin ve (e,f) 2 mm mesafeden püskürtülmüş şerit numunelerin görüntüleri.

Şekil 4'te açıkça görüldüğü gibi geleneksel ingotların sertlikleri 50 HV iken hızlı katılaştırılmış şeritlerin sertlikleri yaklaşık 100 HV çıkmıştır. Hızlı katılaştırmanın mekanik özellikleri üzerinde sergilemiş olduğu olağan üstü dönüşüm açıkça mikro sertlik sonuçlarından görülmektedir. Üstelik hiçbir alaşım elementi eklemekten sadece katılaştırmanın hızlı yapılması ile iki kat sertlik artışı olmuştur. Bilindiği gibi hızlı katılaştırma tekniği, Duwez'in tesadüf eseri yaptığı deney sırasında bakır damlacıklarının bir levhaya düşerek katılaştığı ve oluşan yeni kristal yapının çok farklı olduğunu söylediği andan itibaren gelişmiştir (Duwez vd. 1960). Bu zamandan sonra hızlı katılaştırma tekniği nano kristal ve hatta amorf metal üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Öte yandan mikrosertlik izlerinden de görüleceği gibi hızlı katılaştırılmış numunenin temas ettiği tane sayısı en az 10 iken geleneksel ingotlarda 1 tane üzerinden sertlik alınabilmektedir. Bu durum tane sınırlarının sertliğe ne denli katkı sağladığını göstermektedir. Çünkü tane sınırlarında atomlar belirli bir düzen olmaksızın rastgele

dizilmişlerdir ve buna bağlı olarak enerjileri tane içlerinde olanlara göre daha yüksektir. Aynı zamanda tane sınırları dislokasyonların kaymasını engelleyici en önemli faktördür.



**Şekil 4.** Mikrosertlik sonuçları, ortalama şerit kalınlığı ve mikrosertlik testinde elde edilen izlerin görüntüleri

#### 4. SONUÇLAR

Tüm bu sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde desenli diskler ile Al alaşımlarının hızlı katılaştırılması elektriksel iletkenlik gibi bazı fiziksel özelliklerde önemli değişiklikler göstermeden mekanik özellikleri iki kat arttırdığını göstermiştir. Bu malzemenin tane boyutunda meydana gelen azalmaların olduğu hem mekanik özelliklerin artması ile hem de elde edilen optik mikroskop görüntüleri ile desteklenmiştir. Alüminyum alaşımları hafifliği ile tanınmaktadır ve bu yüzden özellikle havacılık endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Fakat mekanik özellikleri genellikle çelikler ve titanyum alaşımları kadar iyi olmadığı için bazı kısıtlamalara girmektedir. Geliştirilen hızlı katılaştırma yöntemi bu dezavantajın bir nebze önüne geçildiğini düşünülmektedir. Eriyik eğirme yönteminden elde edilen uzun şeritlerin bu hali ile kullanımı pek mümkün olmadığı için araştırmacılar bu şeritleri toz haline getirdikten sonra extrude ederek bulk ingot haline getirmektedirler. Bu sayede süper mekanik özelliklere sahip bu alaşımlar istenilen uygulamadan rahatlıkla kullanılmaktadır. Çalışmamızda tasarladığımız desenli disk ile eriyik eğirme yönteminden direk toz halinde ekstrüzyona uygun ürünlerin çıkabileceği deneysel olarak kanıtlanmıştır.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörü tarafından finanse edilmiştir (Proje No: 2021-GENL-Müh-0005).

## KAYNAKÇA

- Akgul, B., Kul, M., & Erden, F. (2023). The puzzling thermal expansion behavior of invar alloys: a review on process-structure-property relationship. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 1–54. <https://doi.org/10.1080/10408436.2023.2170975>
- Akinribide, O. J., Ogundare, O. D., Akinwamide, S. O., Gamaoun, F., & Olubambi, P. A. (2022). Alloying effect of copper in AA-7075 aluminum composite using bale out furnace. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 3849–3856. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.054>
- Balasubramanian, N., & Langdon, T. G. (2016). The Strength–Grain Size Relationship in Ultrafine-Grained Metals. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 47(12), 5827–5838. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3499-2>
- Durman, M., & Murphy, S. (1991). Precipitation of metastable  $\epsilon$ -phase in a hypereutectic zinc-aluminium alloy containing copper. *Acta Metallurgica et Materialia*, 39(10), 2235–2242. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(91\)90005-L](https://doi.org/10.1016/0956-7151(91)90005-L)
- Duwez, P., Willens, R. H., & Klement, W. (1960). Continuous series of metastable solid solutions in silver-copper alloys [19]. In *Journal of Applied Physics* (Vol. 31, Issue 6, pp. 1136–1137). American Institute of PhysicsAIP. <https://doi.org/10.1063/1.1735777>
- Emani, S. V., Benedyk, J., Nash, P., & Chen, D. (2009). Double aging and thermo-mechanical heat treatment of AA7075 aluminum alloy extrusions. *Journal of Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3879-8>
- Hansen, N. (2004). Hall–Petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia*, 51(8), 801–806. <https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTA-MAT.2004.06.002>
- Kilicaslan, M. F., Elburni, S. I., & Akgul, B. (2021). The Effects of Nb Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Melt Spun Al-7075 Al-loy. *Advances in Materials Science*, 21(2), 16–25. <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0008>
- Kılıçaslan, M. F., Yılmaz, Y., Akgül, B., Karataş, H., & Vurdu, C. D. (2021). Effect of Fe-Ni Substitution in FeNiSiB Soft Magnetic Alloys Produced by Melt Spinning. *Advances in Materials Science*, 21(4), 79–89. <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0026>
- Kılıçaslan, M. F., Yılmaz, Y., Akgül, B., & Tiryaki, H. (2022). Effects of flash annealing and external magnetic field on magnetic properties of relatively high Nd content (37% by weight) NdFeB alloy. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(29), 22728–22735. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08992-2>
- Klement, W., Willens, R. H., & Duwez, P. (1960). Non-crystalline structure in solidified Gold-Silicon alloys. *Nature*, 187(4740), 869–870. <https://doi.org/10.1038/187869b0>

- Kul, M., Akgul, B., & Karabay, Y. Z. (2023). The relationship of hot and cold rolling processes with the structure and properties of invar 36. *Materials Chemistry and Physics*, 295, 127215. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127215>
- Kul, M., Akgul, B., Oskay, K. O., Alsan, A. E., & Karaca, B. (2021). Optimisation of recycled moulding sand composition using the mixture design method. *International Journal of Cast Metals Research*, 34(2), 104–109. <https://doi.org/10.1080/13640461.2021.1936381>
- Leng, J., Ren, B., Zhou, Q., & Zhao, J. (2021). Effect of Sc and Zr on recrystallization behavior of 7075 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(9), 2545–2557. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65674-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65674-1)
- Li, Y., Zheng, X., Zhang, W., & Luo, Z. (2009). Effect of deformation temperature on microstructures and properties of 7075/6009 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(5), 1037–1043. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60403-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60403-3)
- Luo, J., Luo, H., Li, S., Wang, R., & Ma, Y. (2020). Effect of pre-ageing treatment on second nucleating of GPII zones and precipitation kinetics in an ultrafine grained 7075 aluminum alloy. *Materials and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108402>
- Rajamuthamilselvan, M., & Ramanathan, S. (2011). Hot deformation behaviour of 7075 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(3), 948–952. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.139>
- Shojaei, K., Sajadifar, S. V., & Yapici, G. G. (2016). On the mechanical behavior of cold deformed aluminum 7075 alloy at elevated temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 670, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.05.113>
- Szymanek, M., Augustyn, B., Kapinos, D., Boczkal, S., & Nowak, J. (2014). The production of material with ultrafine grain structure in Al-Zn alloy in the process of rapid solidification. *Archives of Foundry Engineering*. <https://doi.org/10.2478/afe-2014-0037>
- Tkatch, V. I., Limanovskii, A. I., Denisenko, S. N., & Rassolov, S. G. (2002). The effect of the melt-spinning processing parameters on the rate of cooling. *Materials Science and Engineering A*, 323(1–2), 91–96. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01346-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01346-6)
- Verhoeven, J. D. (1991). *Fundamentals of physical metallurgy*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Wang, Y., Wu, X., Cao, L., Tong, X., Zou, Y., Zhu, Q., Tang, S., Song, H., & Guo, M. (2021). Effect of Ag on aging precipitation behavior and mechanical properties of aluminum alloy 7075. *Materials Science and Engineering A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140515>

Yang, H. Bin, Li, M. N., Bu, H. Y., & Lu, X. (2020). Effects of alloying elements on the amounts of MgZn<sub>2</sub> and S-Al<sub>2</sub>CuMg phase in 7075 aluminum alloy. *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*, 05(02), 2050003. <https://doi.org/10.1142/S2424913020500034>

## Bölüm 8

### BİNGÖL İLİ İLKÖĞRETİM YAPILARI İÇ MEKÂN HAVA KALİTESİ PARAMETRELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

***Fatma KÜRÜM VAROLGÜNEŞ<sup>1</sup>,  
Perihan ÇULUN<sup>2</sup>, Gonca ÖZER YAMAN<sup>3</sup>***

---

1 Doçent Doktor, Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü, Orcid no:

2 Doktor, Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid no: 0000-0002-1797-9695

3 Doktor Öğretim Üyesi, Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü, Orcid no: 0000-0002-0156-3994



## 1. GİRİŞ

İnsanlar zamanlarının büyük bir bölümünü iç mekanlarda geçirmektedir. İç mekanlarda kullanıcıların sağlıklı yaşamaları için mekanların termal konfor koşullarının sağlanması gerekmektedir. Termal konfor, “ısıl çevreden memnuniyeti ifade eden ve öznel değerlendirme ile değerlendirilen zihin durumu” olarak tanımlanır (ASHRAE-Handbook, 1989). Yapılan birçok çalışma farklı bina ve iklim tiplerinde konfor şartlarının farklı olduğunu göstermektedir (Rodríguez ve ark., 2021; Kwong ve ark., 2014; De Dear ve Schiller Brager, 2001). Eğitim yapıları da farklı yaş gruplarında birçok öğrenci ve öğretmen tarafından kullanılmaktadır. Öğrenciler günün büyük bir bölümünü okullarda geçirmektedir ve eğitim alan çocuklar olumsuz bir iç ortam hava koşuluna maruz kalmaktadırlar (Bluyssen, 2016). Bu nedenle sınıf özellikleri ile konfor arasındaki ilişkiler dikkatle araştırılmalıdır (Bluyssen ve ark., 2018). Eğitim binalarının amacı, öğrenciler ve öğretmenler için en iyi öğrenme koşullarını sağlamak olduğundan (Mandell ve Heath, 2005), sınıflar konsantrasyonu artıran ve öğrenme sürecini teşvik eden (Mishra ve Ramgopal, 2014) ve aynı zamanda iklime duyarlı (Fantozzi ve ark., 2019) olacak şekilde tasarlanmalıdır. Öğrencilerin sağlığını ve üretkenliğini artırmak için sınıflarda termal konforun sağlanması esastır (Lamberti ve ark., 2020). Yang ve ark. (2018) küçük yaş grubunu içeren ilkokullara odaklanan çalışmaların literatürde sınırlı olduğunu belirtmiş ve yapılan çalışmaların da genel olarak tropik iklim, subtropik iklim, çöl iklimi, akdeniz iklimi ve sıcaklık iklim şartlarında yapıldığını belirtmiştir. Yine Türkiye’de de özellikle soğuk iklim bölgesinde yer alan okullarda termal konfor ve termal duyular üzerine çok fazla çalışma yapılmadığı görülmektedir. Bu nedenle çalışmada Doğu Anadolu Bölgesinde bulunan Bingöl İlinde 4 devlet okulu tercih edilmiştir (100. Yıl Ortaokulu, 75. Yıl İlkokulu, Vali Kurtuluş Şişmantürk İlkokulu, Mimar Sinan İlkokulu). Projeye başlandığında 100. Yıl İlkokulu, başlangıçta ilkokul olarak hizmet verirken daha sonra yenilenerek ortaokul olarak hizmet vermeye başlamıştır. Yapılan çalışmada COVID-19 nedeniyle ölçüm sayısı okulların eğitim dönemi olan güz ve bahar döneminde öğrencilerin okula gitme durumları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu nedenle sınıf ölçümleri sınırlı tutulmuştur. 75. Yıl İlkokulunda Doğu-Batı doğrultusunda, Vali Kurtuluş Şişmantürk, Mimar Sinan İlkokulunda ve 100. Yıl ortaokulunda ise Kuzey-Güney doğrultusunda 2 sınıf ölçüm için seçilmiştir. Bu çalışmada iç ortam sıcaklığı, bağıl nem, hava akış hızı materyal bölümünde belirtilen cihazlar ile ölçülüp analiz edilmiştir, nitel yöntem kullanılarak PPD memnuniyetsizlik yüzdesi ve PMV duyum ölçeği anketler düzenlenerek değerlendirilmiştir. Çalışmaya literatür taraması yapılarak başlanılmış, çalışma kapsamı ortaya konulmuş ve ölçümler yapılmıştır. Yapılan çalışmada, doğal olarak havalandırılan sınıflarda öğ-



rencilerin kapalı termal ortamlarına adaptasyonları gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile eğitim yapılarının iç ortam termal konfor koşullarının araştırılması ve anket verileri ile kullanıcıların konfor koşullarını değerlendirmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca çalışma ile konfor sıcaklığı ve nötr sıcaklık aralığı belirlenerek uluslararası uyarlanabilir termal konfor standartlarıyla karşılaştırmalar yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Termal Konfor Çalışmaları

Mekan kullanıcıları, bilinçli veya bilinçsiz olarak içinde bulunduğu termal ortam koşullarının oluşmasında aktif rol oynamaktadırlar. Bu durum adaptif yaklaşım olarak adlandırılmaktadır. Adaptif yaklaşım, insanların çevredeki termal ortamı değiştirme (duruşu değiştirme, ayar noktası oda sıcaklığını değiştirme, metabolik hızı ayarlama, vb.) durumudur (Choi ve Yeom, 2019). Çalışmada bu durum dikkate alınarak belirlenen okullardaki sınıflarda ölçümler yapılmıştır. Çalışma için ısı kaybının en fazla olduğu düşünülen en üst katlarda 75. Yıl İlkokulunda Doğu-Batı doğrultusunda, Vali Kurtuluş Şişmantürk, Mimar Sinan İlkokulunda ve 100. Yıl ortaokulunda ise Kuzey-Güney doğrultusunda 2 sınıfta ölçümler yapılmıştır. Çalışmada ölçülen termal konfor parametreleri şunlardır (Chen ve ark., 2016; Humphreys ve ark., 2007; Yılmaz, 2006; Wang, 2006):

- hava sıcaklığı,
- ortalama radyan sıcaklıkları,
- hava bağıl nemi,
- hava hızı

Parametreler, oturan kişiler için ISO, EN ISO 7726:2001 standardına göre zeminden 1,1 m yükseklikte sürekli olarak ölçülmüştür (ISO, 2001). Çalışmada kullanılan cihazlar Tablo 1'de belirtilmiştir.

*Tablo 1* Ölçülen parametreler ve kullanılan araçlar (Çulun ve ark., 2022)

| Parameters                      | Instrument                         | Range           | Accuracy                                             |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------|
| <b>Outdoor Temp.</b>            | Testo 480 CMI                      | 0 to 60 °C      | <b><math>\pm 0.5</math></b>                          |
| <b>Comfort Temp.</b>            | Testo 480 CMI                      | 0 to 60 °C      | <b><math>\pm 0.5</math></b>                          |
| <b>Relative Humidity (RH)</b>   | Testo 480 CMI                      | 0 to 100%       | <b><math>\pm</math></b> (1.0% rH + 0.7% Reading)     |
| <b>Air flow rate</b>            | Hot Wire Anemometer DT8880         | 0.1 to 25.0 m/s | <b><math>\pm 5\%</math> <math>\pm 0.1</math> m/s</b> |
| <b>Mean radiant temperature</b> | Cool-Us CU-IT InfraRed Thermometer | 0 to 50 °C      | $\pm 0.4$ °C                                         |

Tüm aletler önceden kalibre edilerek ölçümlere başlanmıştır. Ölçüm süresi her okul özelinde tercih edilmiş sınıflarda ortalama 25-30 dk sürmüştür. Ölçüm cihazları öğrencilerin oturma şekline göre eşit mesafede konumlandırılmıştır. ASHRAE Standart 55–2004 ve ISO 7730 uluslararası standartlarında verilen termal konfor aralıkları (Peeters ve ark., 2009; ASHRAE-Standart-55, 2013; ASHRAE-Handbook, 1989) dikkate alınarak, tablo ve grafikler kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Kaydedilen veriler, Fanger’in endekslerini, PMV ve PPD’yi Uluslararası ASHRAE Standart 55-2004, ISO 7730 standardına göre termal konforunu değerlendirmek için detaylandırılmıştır (De Oliveira ve ark., 2020; Fanger, 1970). Araştırma esnasında sınıf pencereleri kışın kapalı, yazın ise doğal havanın sağlanması için açık tutulup öğrencilerin ders dinleme pozisyonu dikkate alınmıştır. Ayrıca ölçümler esnasında tüm sınıflara anket uygulanmıştır. Anket çalışması esnasında kız ve erkek öğrenciler rastgele değerlendirilmiş ve cinsiyet göz ardı edilmiştir. Çocukların yönetim tarafından belirlenen formayla okula geldikleri gözlemlenmiştir. Bu nedenle çocuklar için ortalama giyim yalıtımının “clo” değerleri ISO 7730 kullanılarak hesaplanmıştır. Kıyafet ısı direnci ortalama soğutma dönemi için 0,35 ve ısıtma dönemi için 0,70 olarak hesaplanmıştır ve PMV tahmini için bir “hata bandı” sağlanmıştır. Termal parametrelerin uzamsal değerlerinde önemli bir farklılık bulunmadığından, her sınıf tek bir PMV ve PPD değeri ile nitelendirilecektir (Tablo 2).

**Tablo 2** Soğutma dönemi için kıyafet ısı direnci ortalaması (ISO 7730)

| Clothing combinations <sup>a</sup>                        | Clo <sup>b</sup> |
|-----------------------------------------------------------|------------------|
| Light dress-short sleeves, stockings, shoes               | 0.30             |
| Light dress-short sleeves, stockings, boots               | 0.36             |
| Light dress-short sleeves, socks, shoes                   | 0.29             |
| Light skirt, short sleeves shirt/blouse, stockings, shoes | 0.36             |
| Light skirt, short sleeves shirt/blouse, stockings, boots | 0.46             |
| Light skirt, short sleeves shirt/blouse, socks, shoes     | 0.39             |
| Shorts, short sleeves shirt/blouse, socks, shoes          | 0.30             |
| Normal trousers, short sleeves shirt/blouse, socks, shoes | 0.49             |

<sup>a</sup> All combinations include underwear. <sup>b</sup> Clo values estimated based on ISO 7730.

Bu anketin anlaşılır olması için öğretmenlerden destek istenmiştir. Anket soruları özetle aşağıdaki konuları içermektedir.

(a) 7 puanlı ASHRAE termal duyum ölçeğine (çok soğuk, soğuk, hafif soğuk, nötr, hafif sıcak, sıcak, çok sıcak) dayalı olarak, katılımcının iç

mekan termal ortamına yönelik termal duyum oyu

(b) 7 puanlık bir ölçeğe dayalı termal tercih oyu (çok daha soğuk, daha soğuk, biraz daha soğuk, değişiklik yok, biraz daha sıcak, daha sıcak, çok daha sıcak)

(c) rahatlık hissi

(d) kıyafet bilgileri

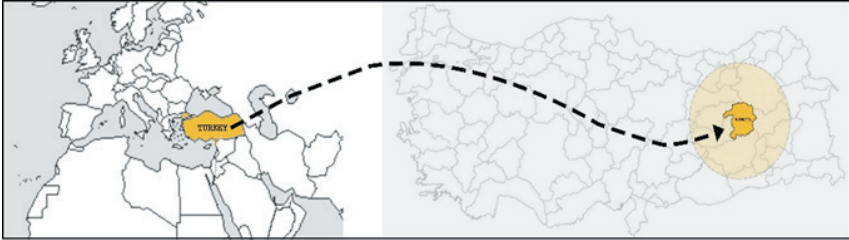
(e) yorgunluk hissi

(f) öğrencilerin anket esnasındaki faaliyetleri

Toplanan yanıtların %15' i veri analizinden çıkarılmıştır. Tutarsız yanıtların analizlerden hariç tutulma yaklaşımı önceki yapılan çalışmalar dikkate alınarak benimsenmiştir (Teli ve ark., 2012; Corgnati ve ark., 2009). Ölçülen verilerden elde edilen PPD değerleri, yapılan anketlerin değerlendirilmesi ile hesaplanan memnun olmayanların yüzdesi ile karşılaştırılmıştır. Sorulan soruların güvenilirliğini belirlemek için Cronbach alfa değerleri kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda araştırmanın %71 gibi düşük bir güven düzeyinde tamamlandığı görülmüştür.

## 2.2. Araştırma Kapsamı

Bingöl İli Köppen-Trewartha iklim sınıflandırmasına göre karasal-ılıman iklim özelliklerine sahiptir. Yaz ayları kısa ve sıcak, kış ayları soğuk ve kar yağışlıdır. Son yirmi yılda bölgede minimum sıcaklığın 25.12°C'lere kadar düşerken, maksimum sıcaklığın 42 °C'yi aştığı görülmektedir. Bingöl ili coğrafi konumu aşağıdaki şekilde görülmektedir (Şekil 1).

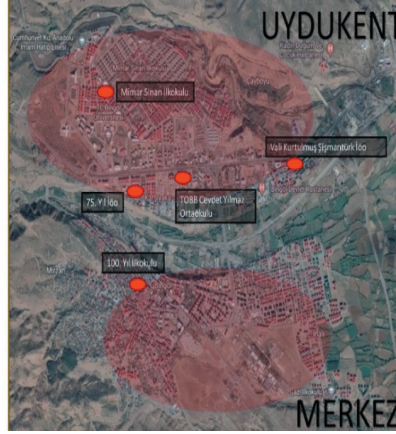


**Şekil 1** Bingöl ilinin Türkiye haritasındaki lokasyonu (Çulun ve ark.,2022).

Çalışma kapsamında incelenen okullar;

- 75. Yıl İlkokulu,
- Vali Kurtuluş Şişmantürk İlkokulu
- Mimar Sinan İlkokulu
- 100. Yıl ortaokuludur.

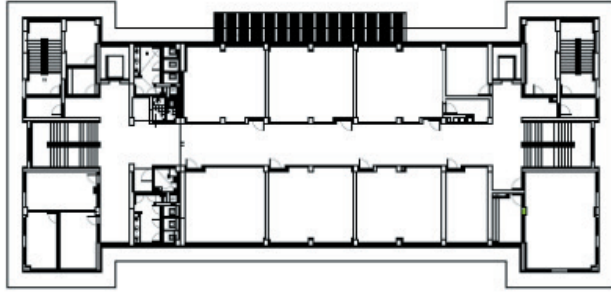
İncelenen okulların Bingöl kentindeki konumları aşağıdaki haritada yer almaktadır (Şekil 2).



**Şekil 2.** Okulların Bingöl kentindeki konumu (Google earth'den alınıp düzenlenmiştir, 2022)

Bingöl İlinde 2003 yılında yıkıcı bir deprem yaşanmıştır. Deprem sonrası tüm okul yapıları yeniden inşa edilmiştir. Okullar etrafındaki yapılar kentsel dönüşümle yükselerek yoğunluk artmıştır. Araştırma yapılan okullardan 75. Yıl İlkokulu, Vali Kurtuluş Şişmantürk İlkokulu ve Mimar Sinan İlkokulu çoğunlukla 6-11 yaş aralığında öğrenciler eğitim almaktadır. 100. Yıl İlkokulu yeniden inşa edilerek ortaokul olarak kullanılmaktadır. İncelenen okullar Milli Eğitim Bakanlığı tarafından uygulanan tip projelerden 2 farklı tip proje özelliklerine sahiptir. Birinci tip okul 16 derslikten oluşmaktadır. 5200 m<sup>2</sup> alana sahip bu okul proje tipi bodrum+zemin+3 kattır. İkinci tip okul 32 derslikten oluşmaktadır. 7400 m<sup>2</sup> alana sahip bu okul proje tipi bodrum+zemin+3 kattır. Okulların özelliklerinin incelemeleri sonucunda 75. Yıl İlkokulu ile ilgili okulun yakın çevre ile ilişkisi, okulun görseli, okulun kat planı aşağıdaki tabloda yer almaktadır (Tablo 3).

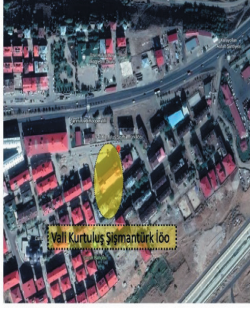
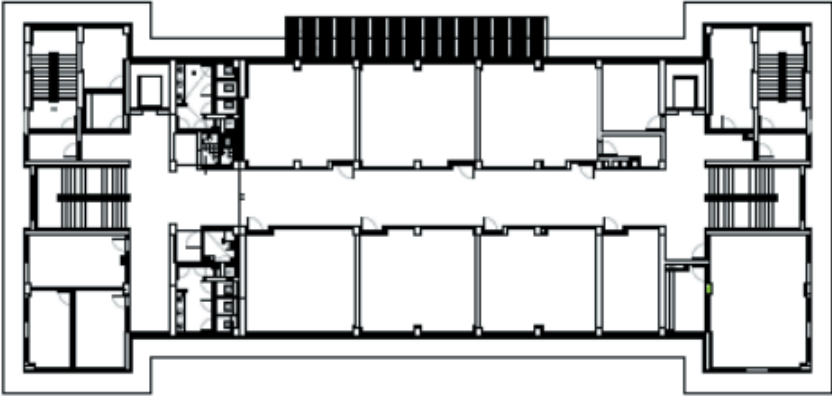
**Tablo 3. 75. Yıl İlkokulu verileri**

|                                                                                   |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Okulun yakın çevre ilişkisi                                                       | Okulun giriş cephesi                                                               |
|  |  |
| Okulun kat planı                                                                  |                                                                                    |
|  |                                                                                    |

Bingöl kenti Karşıyaka Mahallesi'nde bulunan 75. Yıl İlkokulunda 16 derslik, 1 atölye, 1 konferans salonu, 3 toplantı salonu, 1 spor salonu, 2 fen laboratuvarı, 1 müzik sınıfı ve 1 kütüphane bulunmaktadır. Birinci tip proje özelliklerine sahip 75. Yıl İlkokulu 16 dersliktir ve 5200 m<sup>2</sup> kapalı alana sahiptir. Okul dikdörtgen forma sahiptir ve sınıflar Doğu-Batı doğrultusunda yerleştirilmiştir. Ortalama derslik büyüklükleri 52 m<sup>2</sup>'dir ve öğrencilere kişi başı 1.50 m<sup>2</sup> alan düşmektedir. Pandemi esnasında yapılan ölçümler sırasında sınıf mevcutları ortalama 12 olduğu görülmüştür. Okulda derslik dolaşım mekanları yetersizdir. Okul yatay ve dikey sirkülasyon alanları öğrenci hareketleri için uygundur. Dersliklere ait depolar bulunmamaktadır. Okul projesi incelendiğinde derslikler dışında müzik, resim ve bilgisayar ve oyun atölyeleri bulunmaktadır. Yatay ve düşey sirkülasyon alanları yönetmeliklere uygun tasarlanmıştır. Sınıf kapıları 90 derece açılmaktadır. Pencere boyutları büyüktür. Mekânlar esnek tasarlanmıştır.

Okulların özelliklerinin incelemeleri sonucunda Vali Kurtuluş Şişmantürk İlkokulu ile ilgili okulun yakın çevre ile ilişkisi, okulun görseli, okulun kat planı aşağıdaki tabloda yer almaktadır (Tablo 4).

**Tablo 4.** *Vali Kurtuluş Şişmantürk İlkokulu verileri*

| <i>Okulun yakın çevre ilişkisi</i>                                                  | <i>Okulun giriş cephesi</i>                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|    |  |
| <i>Okulun kat planı</i>                                                             |                                                                                    |
|  |                                                                                    |

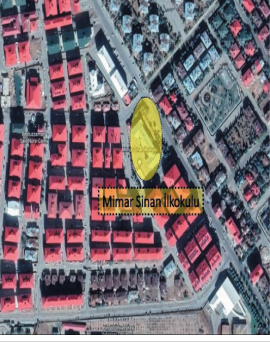
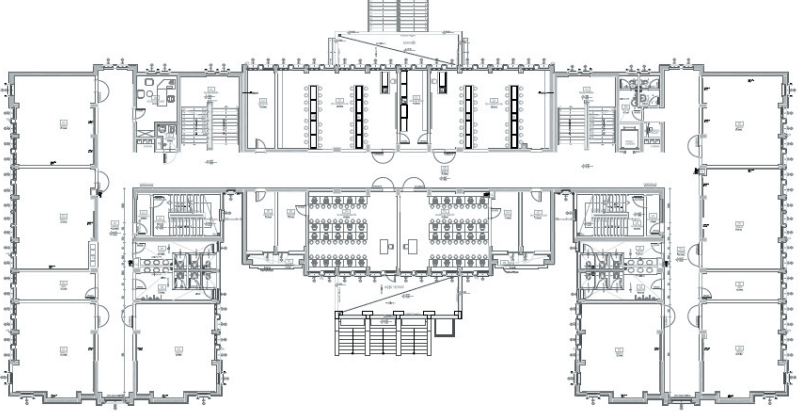
Bingöl kenti Saray Mahallesi'nde bulunan Vali Kurtuluş Şişmantürk İlkokulunda 16 derslik, 1 çok amaçlı salon, 1 fen laboratuvarı, 1 müzik sınıfı, 1 resim sınıfı, 1 kütüphane, bulunmaktadır. Birinci tip proje özelliklerine sahip okul 16 dersliktir ve 5200 m<sup>2</sup> kapalı alana sahiptir. Okul dikdörtgen forma sahiptir ve sınıflar kuzey-güney doğrultusunda yerleştirilmiştir. Ortalama derslik büyüklükleri 52 m<sup>2</sup>'dir, derslikler 35 öğrenciye uygun ve öğrencilere kişi başı 1.84 m<sup>2</sup> alan düşmektedir. Pandemi esnasında yapılan ölçümler sırasında sınıf mevcutları ortalama 12 olduğu görülmüştür. Okulda derslik dolaşım mekanları yetersizdir. Okul yatay ve dikey sirkülasyon alanları öğrenci hareketleri için uygundur. Dersliklere ait depolar bulunmamaktadır. Okul projesi incelendiğinde derslikler dışında müzik, resim ve bilgisayar ve oyun atölyeleri bulunmaktadır. Yatay ve dikey sirkülasyon alanları yönetmeliklere uygun tasarlanmıştır. Sınıf kapıları 90 derece açılmaktadır. Pencere boyutları büyüktür. Sınıf için dolaşım alanı yetersizdir. Mekânlar esnek tasarlanmamıştır.

Okulların özelliklerinin incelemeleri sonucunda Mimar Sinan İlko-



kulu ile ilgili okulun yakın çevre ile ilişkisi, okulun görseli, okulun kat planı aşağıdaki tabloda yer almaktadır (Tablo 5).

**Tablo 5.** *Mimar Sinan İlkokulu verileri*

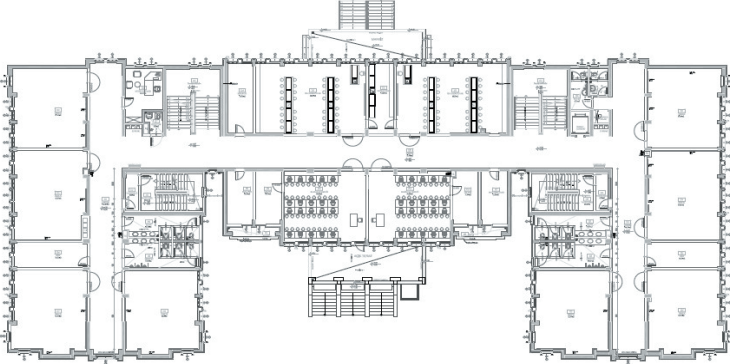
| <i>Okulun Yakın Çevre İlişkisi</i>                                                  | <i>Okulun giriş cephesi</i>                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|    |  |
| <i>Okulun kat planı</i>                                                             |                                                                                    |
|  |                                                                                    |

Bingöl kenti Selahattin Eyyubi Mahallesinde bulunan Mimar Sinan İlkokulunda 32 derslik, 2 atölye, 2 spor salonu, 2 toplantı odası, 1 laboratuvar, 1 çok amaçlı salon, 1 oyun odası bulunmaktadır. İhtiyaca göre laboratuvarlarda derslik olarak hizmet vermektedir. İkinci tip proje özelliklerine sahip okul 7400 m<sup>2</sup> kapalı alana sahiptir. Okul U forma sahiptir ve 3 bölüme ayrılmıştır. Sınıflar çoğunlukla ana gövdeye eklenmiş iki kolda bulunmaktadır. Okulda bulunan sınıf kolları kuzey-güney doğrultusunda yönlendirilmiştir. Sosyal aktivite ve ortak alanlar (müzik, resim ve bilgisayar ve oyun atölyeleri, kütüphane, öğretmen odaları, konferans salonları, mutfaklar ve kantinler v.b.) ana gövdede ve doğu-batı yönünde konumlandırılmıştır. Ortalama derslik büyüklükleri 53 m<sup>2</sup> olup normal eğitim döneminde ortalama derslik mevcudu 35-40 arasındır (Tablo 3.3). Bir sırayı

iki (2) öğrencinin paylaştığı bir oturma düzeni mevcuttur. Her iki okulda da derslik mekânlarında öğrencilere ortalama 1.39 m<sup>2</sup> alan düşmektedir. Pandemi esnasında yapılan ölçümler sırasında sınıf mevcutları ortalama 15 olduğu görülmüştür. Dersliklere ait depolar bulunmamaktadır. Kişisel malzeme depoları yetersiz kalmaktadır. Giysi askıları, derslik içerisinde açıkta bulunmakta ve alanı daraltmaktadır. Pencere boyutları sınıfın aydınlatılması ve havalandırılması için yeterli değildir. Pencere camları çift cam olarak tasarlanmıştır. Sınıf için dolaşım alanı yetersizdir. Duvarlar tuğladır ve mantolama tekniğiyle yalıtım yapılmıştır. Örtü sistemi soğuk iklim bölgelerinde kullanılan kırma çatı sistemidir. Geniş saçaklarla bina yağmur ve güneşten korunmuştur. Ayrıca okul projesinde teras çatı sistemleri de bulunmaktadır. Soğuk iklim bölgesinde termal konfor açısından duvar ve çatı tasarımı büyük önem taşımaktadır.

Okulların özelliklerinin incelemeleri sonucunda 100. Yıl İlkokulu ile ilgili okulun yakın çevre ile ilişkisi, okulun görseli, okulun kat planı aşağıdaki tabloda yer almaktadır (Tablo 6).

**Tablo 6.** 100. Yıl Ortaokulu verileri

| <i>Okulun Yakın Çevre İlişkisi</i>                                                  | <i>Okulun giriş cephesi</i>                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|   |  |
| <i>Okulun kat planı</i>                                                             |                                                                                    |
|  |                                                                                    |

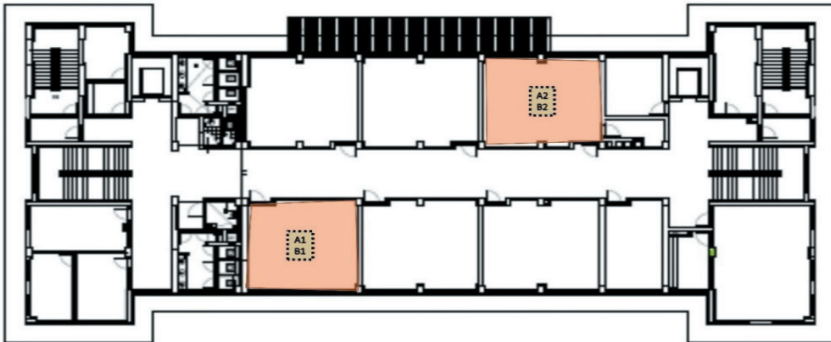




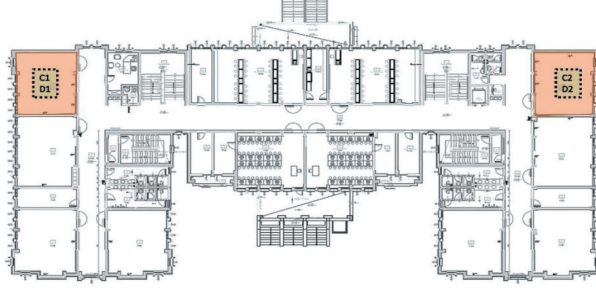
|                                         |                |       |       |       |      |      |      |      |
|-----------------------------------------|----------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| Normalde Sınıf mevcudu                  | 35             | 35    | 30    | 30    | 35   | 40   | 40   | 40   |
| Ölçüm esnasında sınıf mevcudu           | 10             | 8     | 14    | 12    | 15   | 8    | 8    | 10   |
| Toplam kapı yüzeyi [m <sup>2</sup> ]    | 2.20           | 2.20  | 2.20  | 2.20  | 2.90 | 2.90 | 2.90 | 2.90 |
| Toplam pencere yüzeyi [m <sup>2</sup> ] | 11.20          | 11.20 | 11.20 | 11.20 | 8.25 | 8.25 | 8.25 | 8.25 |
| Aydınlatma tipi                         | fluorens lamba |       |       |       |      |      |      |      |
| Isıtma tipi                             | Doğal gaz      |       |       |       |      |      |      |      |

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Okul çocukları kreş çağından üniversite çağına kadar yaş gruplarına ayrılır. Bu nedenle, çalışmalar yapılırken yaş gruplarının özelleştirilmesi termal gereksinimlerdeki farklılıkları ortaya koyma açısından önemlidir. Çalışmada doğal havalandırmalı devlet okulları inceleme alanı olarak seçilmiştir. Seçilen okullar Bingöl İlinin farklı mahallelerinde bulunmaktadır. Dört okulun ortak yanı konut yoğunluğu arasında sıkışmış ve açık yeşil alanlarının çok az olmasıdır. Proje sürecinde COVID-19 salgın hastalığı sebebi ile okullar uzun süreli kapatılmıştır. Bu nedenle ölçüm sayıları sınırlı günlerde sıklaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler güz eğitim dönemi ve bahar eğitim dönemini kapsayacak şekilde iki dönemde yapılmıştır. Şekil 3-a,b’de yer alan kat planlarında ölçüm yapılan sınıflar görülebilmektedir. 75. Yıl İlkokulunda sınıflar Doğu-Batı doğrultusunda yerleştirilmişken, Vali Kurtuluş Şişmantürk, Mimar Sinan İlkokulunda ve 100. Yıl ortaokulunda sınıflar Kuzey-Güney doğrultusunda yerleştirilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 3.** (a) kare plan tipi okullarda ölçüm yapılan sınıflar, (b) U plan tipi okullarda ölçüm yapılan sınıflar

Hazırlık aşamasında okullara çeşitli ziyaretler yapılmıştır. Bu, binaların planlarının toplanmasına ve bunların işleyişi ile ilgili bilgilerin ve her bir binanın alanlarının fotoğraflar çekilerek bilgiler toplanmıştır. Okulların açık olduğu günler tespit edilerek program yapılmıştır ve uygun günlerde teknik ölçümleri yapmak için sınıflarda ekipmanlar kurulmuştur. Öğretmen ve araştırmacı, öğrencilere ekipmanın neyi ölçtüğünü kısaca açıklanmıştır. Sınıfın ortasına ölçüm aletleri yerleştirilerek sınıfın çeşitli noktalarında termal sıcaklık ve hava hızı ölçülmüştür.

### 3.1. Termal Konfor Ölçüm Sonuçları

#### 3.1.1. İç ortam ve ısıtım sıcaklıkları

Yapılan ölçümlerde kış dönemi konfor koşulları için eğitimin devam ettiği ve öğrencilerin okulda bulunduğu ay olan Aralık ayına ait veriler, yaz dönemi için ise Haziran, Temmuz, Ağustos aylarına ait veriler esas alınmıştır. Yaz ve kış dönemi konfor sıcaklıkları birbirinden bir miktar farklı olmakla birlikte ISO 7730'a göre %50 bağıl nem için yaz döneminde 23-26 °C; kış döneminde ise 20-24°C olduğu bilinmektedir (Yaman Karadeniz ve ark. 2015; Özdamar ve Umaroğulları 2017). U plan tipleri üzerinde yer alan A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2 sınıflarında iç ortam sıcaklık, bağıl nem ve hava hız değerleri ölçülmüş, sonuçlar Şekil 3-a ve Şekil 3-b'de gösterilmiştir.

Ortamı çevreleyen ve ortama göre sıcaklık değeri daha yüksek ya da daha düşük olan duvarlarla insan vücudu arasında ısıtım ile meydana gelecek ısı transferi de insanda rahatsız edici etkiye sebep olacaktır. Bu bakımdan iç mekânı çevreleyen duvarlardan alınan sıcaklıkların da göz önüne alınması ve mekânın ısıtım sıcaklıklarının da iç ortam sıcaklığı ile birlikte değerlendirilmesi gereklidir. Mekânın ısıtım sıcaklıklarının farklı

yöntemlerle hesaplanması mümkündür. Bu çalışmada ortam ısıtım sıcaklık değeri ( $T_r$ ), iç ortam sıcaklıkları ( $T_i$ ) değerine bağlı olarak 1 denklemi ile hesaplanmıştır (Nagano ve ark., 2004).

$$T_r = 0.99 \times T_i - 0.01 \quad (1)$$

Bunun dışında ısıtım sıcaklığı hacmi çevreleyen duvar ortalama sıcaklıklarının bilinmesi durumunda 2 denklemi ile de hesaplanabilir (Altıntaş, 2008).

$$T_r = (0.08(T_d + T_t) + 0.23(T_{sağ} + T_{sol}) + 0.35(T_{\delta} + T_a)) / (2(0.08 + 0.23 + 0.35)) \quad (2)$$

$T_r$  = Ortalama ısıtım(radyan) sıcaklığı (°C)

$T_d$  = Döşeme yüzey sıcaklığı (°C)

$T_t$  = Tavan yüzey sıcaklığı (°C)

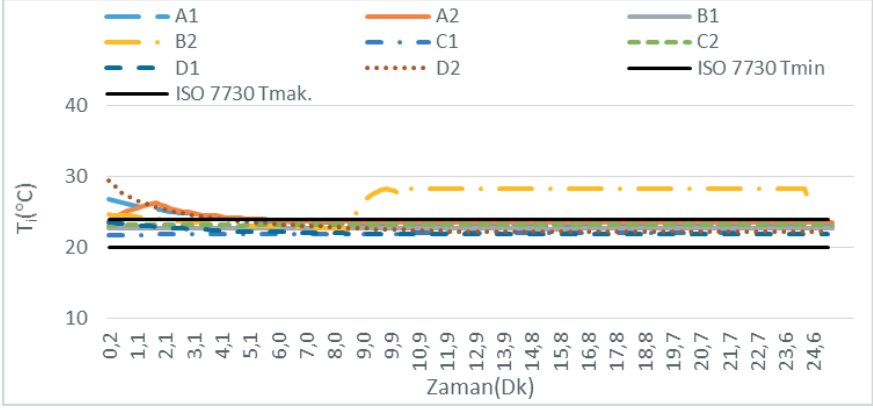
$T_{sağ}$  = Sağ düzlem yüzey sıcaklığı (°C)

$T_{sol}$  = Sol düzlem yüzey sıcaklığı (°C)

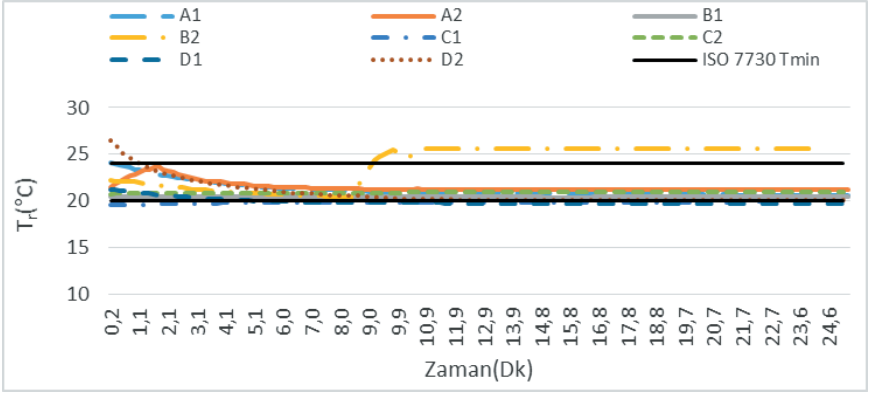
$T_{\delta}$  = Ön düzlem yüzey sıcaklığı (°C)

$T_a$  = Arka düzlem yüzey sıcaklığı (°C)

Kış aylarında soğuk dış ortam sıcaklıklarından dolayı iç duvar sıcaklık değerleri doğal olarak iç ortam sıcaklığından bir miktar daha düşüktür. TS825 ısı yalıtım kuralları kapsamında kış aylarında iç duvar ile iç ortam sıcaklık değerleri arasında maksimum 3°C fark olması istenir. İç duvar sıcaklığı ve iç ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının bu değer üzerinde olması durumunda ortam ısıtılıyor olmasına rağmen vücut ile soğuk duvar arasında olan ısıtım ile ısı transferi konforsuzluk hissi oluşturmaktadır. Yaz için de benzer bir değerlendirme yapılabilir. Nitekim yazın farklı bölgelere bağlı olarak çevre sıcaklıkları 40°C gibi çok yüksek sıcaklıklara çıkabilmektedir. Oysa iç ortam sıcaklığı ise bu değerden daha düşük olacaktır. Yine sıcak çevre ortamına bakan dış duvarlar iç mekâna göre daha sıcak olacaktır. İçerisi klima vb. bir cihazla havalandırılıyor olsa da yüksek sıcaklıklı dış duvar ile kişi vücudu arasında yüksek oranda gerçekleşecek ısıtım ile ısı transferinden dolayı kişide konforsuzluk hissi oluşacaktır. Kışın konfor şartlarının bozulmaması ve küf oluşumunun başlamaması için iç yüzey sıcaklığı, iç ortam sıcaklık değerlerinden (çatı, duvar vb. bütün yüzeyler için) en fazla 3°C düşük olacak şekilde tasarlanmalıdır. Yaz ve kış konfor şartlarının sağlanması için yapıda uygun ısı yalıtımının yapılması gerekir (TS 825). Dolayısıyla yapılacak uygun ısı yalıtımı ile kışın içeriden dışarıya ısı kayıpları engellendiği gibi, yazın da dışarıdan içeriye doğru olan ısı transferi engellenerek gereksiz soğutma yüklerine engel olunabilir.

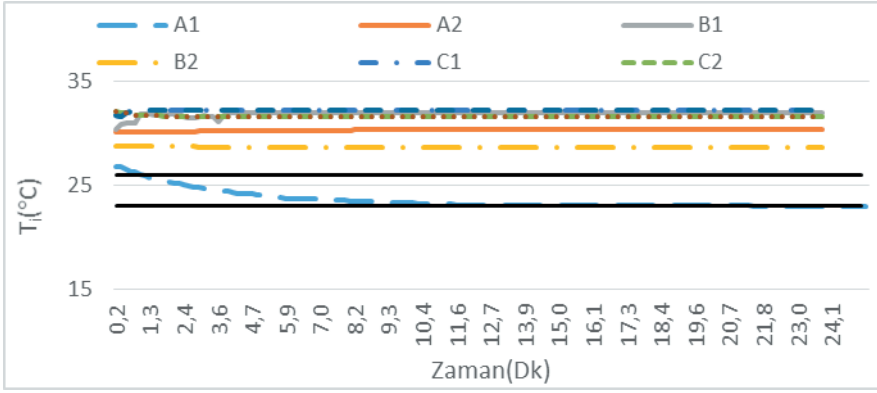


Şekil 4. Kış dönemi iç ortam sıcaklık ölçüm sonuçları

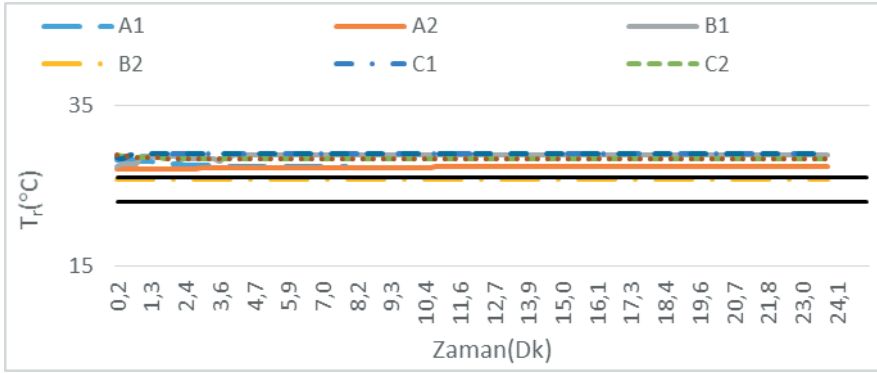


Şekil 5. Kış dönemi iç ortam ısıtım sıcaklığı ölçüm sonuçları

İç ortama sıcaklık değerleri Şekil 4'de, 1 denklemi ile hesaplanan ısıtım sıcaklıkları ise Şekil 5'te sunulmuştur. Görüldüğü gibi iç ortam sıcaklık değeri ile ısıtım sıcaklıkları arasında ortalama 3°C fark vardır. Her iki şekilden B<sub>2</sub> sınıfının dışındaki sınıfların iç ortam ve ısıtım sıcaklıklarının 20-25°C arasında olup, ISO7730 standartları aralığında kaldığı anlaşılmaktadır. Tablo 8'de yer alan ısıtma dönemi ortalama değerleri de bu durumu desteklemektedir.



Şekil 6. Yaz dönemi iç ortam sıcaklık ölçüm sonuçları



Şekil 7. Yaz dönemi ortam ısıtım sıcaklık ölçüm sonuçları

Yaz dönemi iç ortam sıcaklıkları ve ısıtım sıcaklıkları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 6’dann görüldüğü gibi iç ortam sıcaklık değerleri genel olarak 25-32°C arasında değişmiştir. İlgili dönemin ısıtım sıcaklıkları da yaklaşık 3°C fark ile daha yüksek olup 25- 35°C aralığında kalmıştır. Bu değerler genel olarak ISO7730 yaz dönemi standart değerleri olan 23-26°C aralığının dışında olup, en yüksek değer üzerinde. Bu durumda yaz dönemi için ilgili sınıfların iç ortam ve ısıtım sıcaklıklarının konforsuz olduğu anlaşılmaktadır. Benzer sonuçlara dönem ortalama sıcaklıklarının verildiği Tablo 8’ten ulaşmak da mümkündür. Nitekim belirtilen tabloda iç ortam minimum ortalama sıcaklık değerinin 28°C’nin üzerinde, ısıtım sıcaklığının ise 27°C ‘nin üzerinde olduğu görülmektedir.

**Tablo 8.** Yaz ve kış dönemi iç mekân ortalama sıcaklık, ışıınım sıcaklığı, bağıl nem ve hava hız değerleri

| Sınıflar              | A1                | A2   | B1   | B2   | C1   | C2   | D1   | D2   |
|-----------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Parametreler</b>   | <b>Kış Dönemi</b> |      |      |      |      |      |      |      |
| $T_i$                 | 23.5              | 23.9 | 22.7 | 26,6 | 22   | 23.3 | 22.1 | 23.1 |
| $\varphi(\%)$         | 31                | 29.9 | 31.1 | 22   | 29.4 | 28   | 30.5 | 26.8 |
| $T_r$                 | 22.2              | 21.5 | 20.4 | 23.9 | 19.8 | 20.9 | 19.9 | 20.8 |
|                       | <b>Yaz Dönemi</b> |      |      |      |      |      |      |      |
| $T_i$                 | 30.6              | 30.3 | 31.9 | 28.6 | 32.2 | 31.6 | 32.2 | 31.6 |
| $\varphi(\%)$         | 30                | 25.7 | 30.1 | 25   | 29.9 | 32   | 29.9 | 32   |
| $T_r$                 | 27.6              | 27.3 | 28.7 | 25.7 | 29   | 28.4 | 29   | 28.4 |
| <b>Hava Hızı(m/s)</b> | 0.45              | 0.33 | 0.24 | 0.24 | 0.27 | 0.27 | 0.24 | 0.31 |

### 3.1.2. İç ortam bağıl nem değerleri

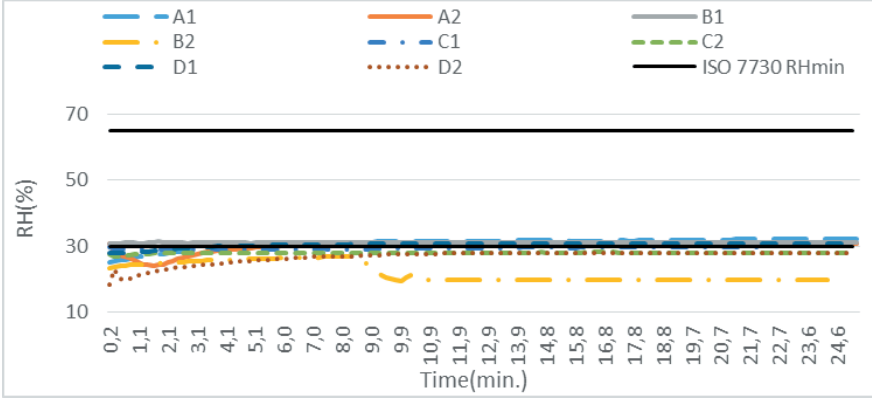
Önemli konfor parametrelerinden biri olan bağıl nem değeri ortam havasının sahip olduğu sıcaklıktaki nem miktarının, aynı sıcaklıkta sahip olabileceği maksimum nem miktarına oranının bir göstergesidir. Başka bir ifade ile ortam havasının mutlak basıncının, aynı sıcaklıktaki doyma basıncına oranıdır. Nem, mutlak basınç ve doyma basınçları sırasıyla  $\varphi$ ,  $P$  ve  $P_d$  olmak üzere, bağıl nem 3 denklemi ile gösterilebilir.

$$\Phi = P/P_d \quad (3)$$

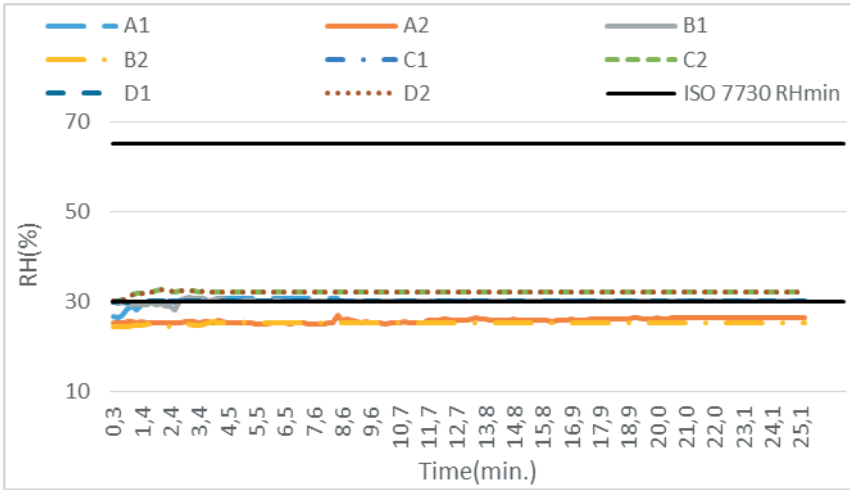
ISO 7730 ve Ashrae 55 standardına göre bağıl nem aralığı %30-65'tir. Konfor koşullarına daha uygun olması bakımından bağıl nem aralığını %35-60 arasında alınması gerektiğini belirten kaynaklar da vardır (Yaman karadeniz, 2015). Bağıl nem konforsuzluğunu alt sınırın altında olması ve üst sınırın üstünde olması durumları için değerlendirmekte fayda vardır. Nitekim bağıl nem değeri alt sınırın altına inmesi durumunda (%30-40'ın altına inmesi) ciltte, dudaklarda kuruluk, kaşıntı vb. sağlık problemlerine sebep olurken, üst sınırın üzerinde olan bağıl (%65in üzerinde olması durumunda) nem ise nefes almada zorluk, aşırı terleme, bunalma hissi vb. rahatsız edici durumlara sebep olmaktadır. Bağıl nemin %40'ın altında olması durumunda influenza (grip) virüsünün yayılma hızının daha yüksek olduğu bilinmektedir (Metz, 2015). Düşük nem değerinin özellikle kış aylarında ortaya çıkması bakımından, kış mevsiminde oluşan mevsimsel gribin temel sebebinin düşük bağıl nem olduğu bilinmektedir (Shaman 2010). Bu tür durumların ise hem insan sağlığı için büyük tehdit hem de insan çalışması ve verimliliği üzerine önemli etkilerinin olduğu vurgulanmalıdır.

Her iki okula ait belirtilen sınıflardan alınan bağıl nem değerleri yaz ve kış dönemleri için sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur. İlgili şekillerden de anlaşıldığı üzere her iki dönem için de bağıl nem değerleri-

nin alt sınıra ya çok yakın ya da alt sınırın altında olduğu görülmektedir. Dolayısıyla iki dönemde de tüm sınıfların bağıl nem bakımından konforsuz olduğu açıktır. Aynı sonuçlar dönem ortalama bağıl nem değerlerinin verildiği Tablo 8'de de görülmektedir. Tabloda yaz ve kış dönem ortalama nem değerlerinin %25-30 civarında olup, konfor aralığının dışındadır.



Şekil 8. Kış dönemi bağıl nem ölçüm sonuçları



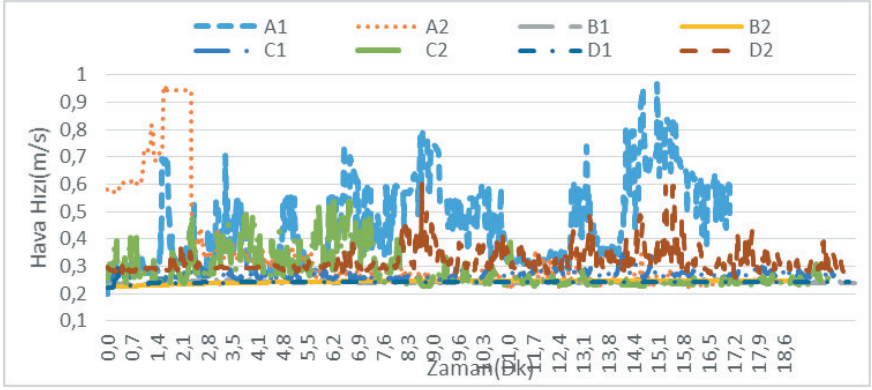
Şekil 9. Yaz dönemi bağıl nem ölçüm sonuçları

### 3.1.3. İç ortam hava hızları

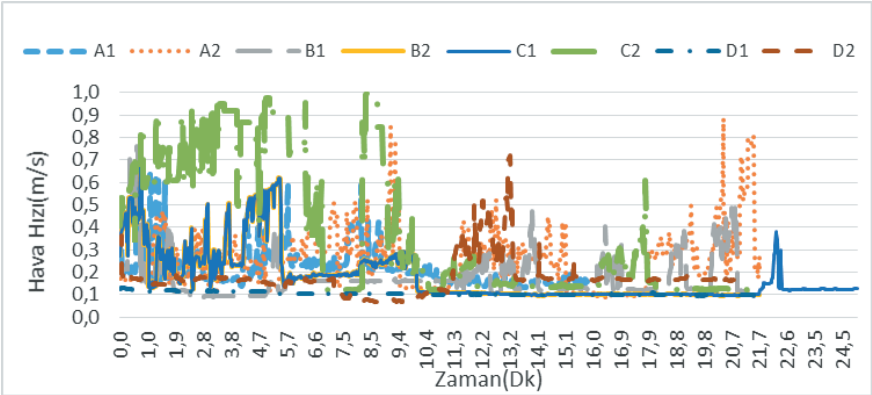
Konfor koşulları ortam havasının sıcaklık ve nem miktarı kadar hava hareketliliği ile de yakından ilişkilidir. Düşük sıcaklıklarda daha durgun hava rahatsız etmez iken; yüksek sıcaklık durumunda havanın da durgun olması bunaltıcı olacaktır. Örneğin 20°C olan ortam sıcaklığında kış aylarında konforlu hava hızı 0,15m/s iken; yaz aylarında 24°C olan ortam sıcaklığında hava hızının 0,22m/s olması konfora daha uygundur (Halıcı 2019). Bu bakımdan yapılan yapılar mimari aşamada hangi bölgede kurulacak ise o bölgenin mevsimsel sıcaklıkları ve binanın yönlerine göre



konumlanması da dikkate alınarak doğal havalandırmadan maksimum faydalanacak şekilde tasarlanmalıdır. Ancak yaz sezonu için konfor değerlendirilmesi yapılırken  $24^{\circ}\text{C}$  olan ortam sıcaklığında hava hızının  $0,22\text{m/s}$  olmasının konfora daha uygun olması (Halıcı 2019), ve Bingöl ilinde yaz dönemi sıcaklıklarının ortalama  $32^{\circ}\text{C}$  olması da göz önüne alınırsa, ortam hava hızının yaklaşık  $0,4\text{m/s}$  gibi bir değerde olması bunaltıcı sıcaklığın etkisini azaltacağından konforsuz olduğu söylenemez. Ancak  $A_1$ ,  $C_2$ ,  $D_2$  sınıflarında hava hızlarının  $0,4\text{m/s}$ 'nin de üzerinde olduğu görülmektedir (Şekil 10). Bu bakımdan hava hızları ortamda yaşayan insanların sağlığı için konforlu değildir. Şekil 10'da aynı sınıfların kış dönemine ait mahal hava hızları verilmiştir. Kış döneminde konforlu mahal hava hızlarının  $0,15\text{m/s}$  olması gerekirken, alınan ölçüm sonuçlarına göre ortalama hava hızları  $0,5\text{m/s}$  civarında olup konforsuz olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 10. Yaz dönemi hava hızı ölçüm sonuçları



Şekil 11. Kış dönemi hava hızı ölçüm sonuçları

Bingöl ili okul yapıların ölçülen konfor şartları ile ilgili genel bir değerlendirme yapılacak olursa kış döneminde genel olarak tüm sınıflarda iç ortam sıcaklık ve ısıtım sıcaklıklarının konforlu olduğu; yaz döneminde iç mekân sıcaklıkları ve ısıtım sıcaklıklarının üst limitin üzerinde olup

konforsuz olduğu; yaz ve kış dönemi bağıl nem değerlerin de alt limit değerlerinin altında olduğu anlaşılmıştır. Bu bakımdan pek çok insanın bir arada bulunduğu kurumlar olan okullar, üniversiteler, öğrenci yurtları, fabrikalar, iş atölyeleri vb. yerlerde her mekânda özellikle nem ve sıcaklığı kontrol eden cihazların bulundurulması ve bu parametrelerin konforsuz bölgede olması durumlarını haber vermesinde fayda vardır. Bu tür toplu halde yaşanan yerlerde ortam hava sıcaklığı ve nemini ölçmeye yarayan basit cihazlar kullanılarak ortam sıcaklık ve nemi izlenip gerekli önlemler alınabilir. Ortam nemi sürekli konforsuz ise uygun mobil nemlendiriciler kullanılabilir. Uzun süre boyunca ısınan ve dolayısı ile aşırı kuruyan iç ortam havası düzenli aralıklarla yapılan havalandırma tekniği ile ortam bağıl nemi normal düzeye getirilebilir. Ortam neminin yetersiz olması kadar fazla olması da istenmeyen durumdur. Coğrafi ve iklim özelliklerinden dolayı yazın bazı bölgelerin nem değeri çok yüksek olabilir. Bu tür yerlerde ise ortam nemini kurutabilecek klima cihazları kullanılabilir.

### 3.2. Anketler için Değerlendirme

Yaşları 7-11 arasında değişen toplam 118 öğrenciye anket uygulanmıştır ve 3304 yanıtlık bir örneklem toplanmıştır. Araştırmaya yönelik proje sunulurken hedef kitlesi olarak ilkokullar tercih edilmiştir. Çalışma yapılacak okulların belirlenmesinde araştırmacılar, okul yönetimleri ve öğretmenler açısından uygunluk, kolay ulaşılabilirlik, katılımda gönüllülük, yeterli katılımcı sayısının elde edilebilmesi gibi durumları göz önüne almıştır. Katılımcılar basit seçkisiz örnekleme yöntemiyle seçilmiştir. Kız ve erkek öğrenciler rastgele seçilip analizlerde cinsiyet faktörü gözardı edilmiştir. Okulların belirlediği resmi kıyafet bulunmaktadır. Ancak bu kıyafetin giyilmesi zorunlu değildir. Öğrencilerin genellikle belirlenen okul kıyafetlerini giydikleri gözlemlenmiştir. Öğrencilerin kış aylarında vücuttaki ısı kaybını önlemek için okul ceket, palto veya termal iç giyim gibi daha fazla yalıtım katmanı tercih ettiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle çocuklar için ortalama giyim yalıtımının “clo” değerleri ISO 7730 kullanılarak hesaplanmıştır. Kıyafet ısıl direnci ortalama soğutma dönemi için 0,35 ve ısıtma dönemi için 0,70 olarak hesaplandı ve PMV tahmini için bir “hata bandı” sağlandı. Termal parametrelerin uzamsal değerlerinde önemli bir farklılık bulunmadığından, her sınıf tek bir PMV ve PPD değeri ile nitelendirilecektir. Toplanan yanıtların %15’i veri analizinden çıkarılmıştır. Tutarsız yanıtların analizlerden hariç tutulma yaklaşımı önceki yapılan çalışmalar dikkate alınarak benimsenmiştir (Teli ve ark., 2012; Corgnati ve ark., 2009). Ölçülen verilerden elde edilen PPD değerleri, yapılan anketlerin değerlendirilmesi ile hesaplanan memnun olmayanların yüzdesi ile karşılaştırılmıştır. Sorulan soruların güvenilirliğini belirlemek için Cronbach alfa değerleri kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda araştırmanın %71 gibi düşük bir güven düzeyinde tamamlandığı görülmüştür. Fanger

(1970) tarafından geliştirilen termal konfor duyarlılık ölçeği anketinin uygulanması esnasında öğrencilerin soruları anlamakta güçlük çektiği ve tutarlı cevapları verme konusunda zorluk yaşadıkları görülmüştür.

Metabolik hız PMV formülünde (ISO 7730) iki şekilde görünür: Dinlenme değeri ile ampirik denklemin bir parçası olarak ortalama bir yetişkinin metabolik hızı (RMR) ( $58.15 \text{ W/m}^2$ ). Aktivite sırasında metabolik hızın dinlenme metabolik hızına oranı ile ifade edilen fiziksel aktivite seviyesini temsil eden bir girdi değişkeni olarak bu oran için kullanılan birim ‘MET’.

“Yerleşik bir kişinin metabolizma hızı (oturmuş, sessiz):  $1 \text{ MET} = 58.15 \text{ W/m}^2 = 50 \text{ kcal/(h m}^2\text{)}$ ” olarak tanımlanır (ASHRAE) (Teli ve ark., 2012).

PMV denkleminin doğası gereği yetişkin fizyolojisine karşılık geldiğini açıkça göstermektedir. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan standartlar tarafından tablolarda sağlanan farklı aktiviteler için birim cilt yüzey alanı başına metabolik hızlar, ortalama bir yetişkin için tipik değerleri temsil eder. Bu değerler yetişkin deneklerle yapılan deneylere dayanmaktadır ve bu nedenle otomatik olarak çocuklar için uygun olarak kabul edilemez. Yetişkinlerle karşılaştırıldığında, çocuklar büyüme yıllarında azalan, kilogram vücut ağırlığı başına daha yüksek bir dinlenme metabolik hızına sahiptir. Ayrıca çocuklar okul günleri boyunca farklı etkinliklerde bulunurlar. Bu nedenle, özellikle çocukların fizyolojisine göre tasarlanmış bir termal konfor modeline ihtiyaç duyulmaktadır.

Çocuklarla daha önce yapılan birkaç termal konfor çalışması, metabolik hızlardaki farkı ele almak için PMV modelinde hesaplamalar yapmıştır. Havenith (2002), okul etkinlikleri için metabolik hızların  $52\text{--}64 \text{ W/m}^2$  aralığında olduğunu belirlemiştir; bu, yetişkinlerin hareketsiz faaliyetler (ofis işleri) ( $70 \text{ W/m}^2$ ) eşdeğerinden yaklaşık %10 daha düşüktür. Çocukların RMR’si son 20 yılda çok sayıda çalışmada ölçülmüştür, ancak “ortalama” bir çocuk için “MET” hesaplaması için kullanılabilecek standart bir değer yoktur. Bu nedenle çalışmada literatürde daha önce hesaplar yapılarak kullanılmış metabolik hız  $1,2 \text{ met}$  ( $58/48,8$ ) olarak düşünülmüştür (hareketsiz aktivite) (Havenith ve ark., 2002; Teli ve ark., 2012; Amorim, 2007). Deneklerin termal duyumları, soğuktan ( $-3$ ) ısıya ( $+3$ ) kadar termal duyum değerlerine sahip ASHRAE ölçeği, TSV ile ölçülmüştür (Tablo 9).

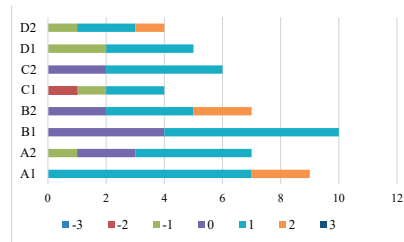
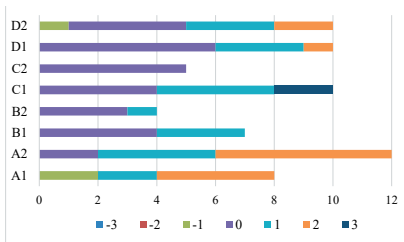
**Tablo 9** ASHRAE Termal duyum ölçeği-Thermal sensation scale (TSV)

|       |       |             |      |            |      |       |
|-------|-------|-------------|------|------------|------|-------|
| Soğuk | Serin | Biraz serin | Nötr | Biraz ılık | Ilık | Sıcak |
| -3    | -2    | -1          | 0    | +1         | +2   | +3    |

Okullarda güz (ısıtma) dönemi ve bahar (soğutma) dönemi olmak üzere iki aşamalı uygulanan anketlerden elde edilen veriler aşağıdaki tablo ve şekilde verilmiştir (Tablo 10, Şekil 12a,b).

**Tablo 10.** ASHRAE Termal duyum ölçeğine göre anket sonuçları

| Dönem            |        | $T_{op}$ | Termal duyum ölçeği-Thermal Sensation scale (TSV) |     |      |      |      |      |     | Toplam |
|------------------|--------|----------|---------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|-----|--------|
|                  |        |          | -3                                                | -2  | -1   | 0    | 1    | 2    | 3   |        |
| Kış Dönemi       | A1     | 23.5     | 0                                                 | 0   | 2    | 0    | 2    | 4    | 0   | 8      |
|                  | A2     | 23.9     | 0                                                 | 0   | 0    | 2    | 4    | 6    | 0   | 12     |
|                  | B1     | 22.7     | 0                                                 | 0   | 0    | 4    | 3    | 0    | 0   | 7      |
|                  | B2     | 26.6     | 0                                                 | 0   | 0    | 3    | 1    | 0    | 0   | 4      |
|                  | C1     | 22       | 0                                                 | 0   | 0    | 4    | 4    | 0    | 2   | 10     |
|                  | C2     | 23.3     | 0                                                 | 0   | 0    | 5    | 0    | 0    | 0   | 5      |
|                  | D1     | 22.1     | 0                                                 | 0   | 0    | 6    | 3    | 1    | 0   | 10     |
|                  | D2     | 23.1     | 0                                                 | 0   | 1    | 4    | 3    | 2    | 0   | 10     |
|                  | Toplam |          | 0                                                 | 0   | 3    | 28   | 20   | 13   | 2   | 66     |
|                  | %      |          | 0                                                 | 0   | 4.50 | 42.4 | 30.3 | 19.7 | 3.1 | 100    |
| Yaz Dönemi       | A1     | 30.6     | 0                                                 | 0   | 0    | 0    | 7    | 2    | 0   | 9      |
|                  | A2     | 30.3     | 0                                                 | 0   | 1    | 2    | 4    | 0    | 0   | 7      |
|                  | B1     | 31.9     | 0                                                 | 0   | 0    | 4    | 6    | 0    | 0   | 10     |
|                  | B2     | 28.6     | 0                                                 | 0   | 0    | 2    | 3    | 2    | 0   | 7      |
|                  | C1     | 32.2     | 0                                                 | 1   | 1    | 0    | 2    | 0    | 0   | 4      |
|                  | C2     | 31.6     | 0                                                 | 0   | 0    | 2    | 4    | 0    | 0   | 6      |
|                  | D1     | 32.2     | 0                                                 | 0   | 2    | 0    | 3    | 0    | 0   | 5      |
|                  | D2     | 31.6     | 0                                                 | 0   | 1    | 0    | 2    | 1    | 0   | 4      |
|                  | Toplam |          | 0                                                 | 1   | 5    | 10   | 31   | 5    | 0   | 52     |
|                  | %      |          | 0                                                 | 1.9 | 9.6  | 19.3 | 59.6 | 9.6  | 0   | 100    |
| Kümülatif toplam |        |          | 0                                                 | 1   | 8    | 38   | 51   | 18   | 2   | 118    |
| %                |        |          | 0                                                 | 0.9 | 6.8  | 32.2 | 43.2 | 15.3 | 1.7 | 100    |



Şekil 12. a) Kış dönemi anket sonuçları, b) Yaz dönemi anket sonuçları,

Güz dönemi olan ısıtma döneminde öğrencilerin, %42.4'i "nötr" gruba oy verirken, %77,2'si konfor aralığı olarak (-1 ila +1) arasında oy vermiştir. Bahar dönemi olan soğutma döneminde de öğrencilerin %19.3'i "nötr" gruba oy verirken %88.5'ü konfor aralığı olarak (-1 ila +1) arasında oy vermiştir. Her iki sezonda da öğrencilerin genel olarak konfor aralığında olduğu tespit edilmiştir. Isıtma döneminde nerdeyse sınıfların serin olduğunu belirten çok az öğrenci olmuştur. Bunun nedeni öğrencilerin kıyafetlerini ısıya göre belirlemeleridir. Birçok öğrencinin sınıfta montla oturduğu ve kıyafetlerinin altına içlik giydikleri tespit edilmişti. Bu nedenle öğrencilerin çoğunluğu olan %92.4'u (0-ila +2) arasında oy vermiştir (Tablo 10). Bu oranın ortaya çıkmasındaki dış etkenler doğal gazın yüksek ısıda yakılması, pencerelerin kapalı ve çift cam olması ve sınıf mevcudunun kalabalık olmasıdır. Çalışmada %18 denek sınıfın daha sıcak olmasını istemiştir.

Soğutma döneminde ise pencereler açık olmasına rağmen %88.5 oranında öğrenci grubu (0 ila +2) arasında oy kullanmıştır. Öğrencilerin neredeyse %84'ü yaz döneminde sınıfların daha serin olması gerektiğini belirtmektedirler. Yapılan ölçümlerde termal konforun standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan hesaplamalar neticesinde PMV ortalaması 0,32'tür. PPD endeksi öğrenciler arasında ortalama memnuniyetsizlik yüzdesi' nin (PPD) %38,2'sini tahmin ederken, yapılan anketlere göre, ısıtma döneminde öğrencilerin sadece %17,4'ü memnuniyetsiz görünürken soğutma döneminde ise %58.6' sı memnuniyetsiz görünmektedir.

Bu çalışmada öğrencilerin ısı konforlarının yapılan ölçümler ve (PMV) modelinden biraz farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuç çocukların ısı duyularının yetişkinlere göre daha farklı olduğunu göstermektedir. Sınıflarda çocukların pencereleri açıp kapatarak veya kıyafetlerini ayarlayarak çevreye uyum sağlama konusundaki sınırlamaları bu tür farklılıkları açıklayabilir (Trebilcock ve ark., 2017; Kim ve de Dear, 2018; Aparicio-Ruiz ve ark., 2021). Eğitim yapıları iç mekân termal konforuna yönelik birçok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir. Farklı iklim bölgelerinde yapılan bu araştırmaların kıyaslama ve değerlendirme yapma açısından önemi büyüktür.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada Bingöl ilinde 2003 depreminden sonra yapılan ilkokullar arasında erişimi kolay olan ve iki (2) farklı tipolojiye sahip dört (4) okul (75. Yıl İlkokulu, Vali Kurtuluş Şişmantürk İlkokulu, Mimar Sinan İlkokulu ve 100. Yıl ortaokulu) seçilmiştir. 100. Yıl Ortaokulu proje çalışmaları esnasında ilkokul olarak yapılmıştır. Daha sonra ortaokul olarak hizmet vermeye başlamıştır. Ölçümler güz eğitim dönemi (kış dönemi) ve bahar eğitim dönemini (yaz dönemi) kapsayacak şekilde iki dönemde

yapılmıştır. 75. Yıl İlkokulunda sınıflar Doğu-Batı doğrultusunda yerleştirilmişken Vali Kurtuluş Şişmantürk, Mimar Sinan İlkokulunda ve 100. Yıl ortaokulunda sınıflar Kuzey-Güney doğrultusunda yerleştirilmiştir.

Bu araştırma anketler yardımıyla nitel bir özellik taşıırken cihazlarla yapılan ölçümler sayesinde nicel bir araştırma olma özelliği taşımaktadır. Yani çalışmada nitel ve nicel araştırma tekniği birlikte kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yaklaşık 7-11 yaş aralığında 118 öğrenciye her ankette 28 soru olmak üzere toplam 3304 soru sorulmuş ve cevapları değerlendirilmiştir. Eşzamanlı olarak iklimsel değişkenler de öğrencilerin termal algısına karşılık gelecek şekilde ölçülmüştür. Analitik çalışma, öğrencilerin termal hissi ve tercihi arasındaki karşılaştırmayı, termal nötrlüğün türetilmesini, konfor aralığını ve sonuçların ulusal ve uluslararası termal konfor standartlarıyla karşılaştırmasını göstermektedir. Öncelikle yapılan ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde; Yaz ve kış konfor standart değerlerinin birbirinden bir miktar farklı olmasıyla birlikte ISO 7730'a göre %50 bağıl nem için kış sezonunda konfor sıcaklığı 20-24°C; yaz sezonunda ise 23-26 °C olduğu bilinmektedir (Yaman Karadeniz vd. 2015). Bu aralıkların dışındaki sıcaklıklarda kişinin konfor durumu doğrudan ya da dolaylı olarak etkilendiği için bu değerlerin üzerinde ya da altındaki değerlerde kişinin, sağlık durumu, çalışma (verimlilik durumu) ve de enerji tasarrufu olumsuz etkilenecektir. Kişinin konfor aralığının dışına çıkan sıcaklıklarda ortam havasının bağıl nemi de olumsuz etkilenmektedir. Bağıl nemin de konforsuz aralığa kayması özellikle kış aylarında grip virüsü gibi virüsler başta olmak üzere çeşitli hastalık ve rahatsızlıkları da beraberinde getirmektedir. Yapının konfor şartları genel olarak kış döneminde tüm sınıflarda iç ortam sıcaklık ve ışıyım sıcaklıklarının konforlu olduğu; yaz döneminde iç mekân sıcaklıkları ve ışıyım sıcaklıklarının üst limitin üzerinde olup konforsuz olduğu; yaz ve kış dönemi bağıl nem değerlerin de alt limit değerlerinin altında olduğu görülmüştür. Bu bakımdan pek çok insanın bir arada bulunduğu kurumlar olan, okullar, üniversiteler, öğrenci yurtları, fabrikalar, iş atölyeleri vb. yerlerde her mekanda özellikle nem ve sıcaklığı kontrol eden cihazların bulundurulması ve bu parametrelerin konforsuz bölgede olması durumlarını haber vermesinde fayda vardır. Bu doğrultuda ortam sıcaklık ve nemi konforsuz ise gerekli tedbirler alınabilir. Konfor sıcaklığı için gerekli ısıtma ya da soğutma yapılabilir. Bağıl nem için uygun mobil nemlendiriciler kullanılabilir. Kış aylarında mekanın ısıtma sistemleri ile ısıtılmasından dolayı iç mekanın bağıl nem oranı düşebilmektedir. Uzun süre boyunca ısınan ve dolayısı ile aşırı kuruyan iç ortam havası düzenli aralıklarla yapılan havalandırma tekniği ile ortam bağıl nemi normal düzeye getirilebilir. Buna bağlı olarak gerektiği zaman ısıtıcının veya klimanın devreye otomatik girmesi, düşük nem durumunda ortamı nemlendiren cihazın çalışması veya klima aracı-

lığı ile yüksek nemin aşağı çekilmesi gibi önlemlerin alınması gereklidir. Bunların dışında kimya ve tekstil endüstrisi gibi toz ve partikül ortamlarında çalışılan mekanlarda ise ek olarak partikül ölçüm cihazlarının da ilave edilmesi gerekmektedir. Ortam neminin yetersiz olması kadar fazla olması da istenmeyen durumdur. Coğrafi ve iklim özelliklerinden dolayı bazı bölgelerin nem değeri çok yüksek olabilir. Bu tür yerlerde ise ortam nemini kurutabilecek klima cihazları kullanılabilir. Konfor koşulları ortam havasının sıcaklık miktarı ve neminin yanı sıra hava hareketliliği ile de yakından ilişkilidir. Düşük sıcaklıklarda daha durgun hava rahatsız etmez iken; yüksek sıcaklık durumunda havanın da durgun olması bunaltıcı olacaktır. Örneğin 20°C olan ortam sıcaklığında hava hızı 0,15m/s iken; 24°C olan ortam sıcaklığında hava hızının 0,22m/s olması konfora daha uygundur (Halıcı 2019). Bu bakımdan yapılan yapılar mimari aşamada hangi bölgede kurulacak ise o bölgenin mevsimsel sıcaklıkları ve binanın yönlere göre konumlanması da dikkate alınarak doğal havalandırmadan maksimum faydalanacak şekilde tasarlanmalıdır.

Anket çalışmalarına göre çocukların yetişkinlere nazaran yüksek sıcaklıklara daha duyarlı olduğu ve bu nedenle dersliklerin daha düşük sıcaklıkta olmasını bekledikleri tespit edilmiştir. Çocukların gün içerisinde vakitlerini geçirdikleri dersliklerde termal duyum adaptasyonu sağlayabilmek için soğutma döneminde pencere, kapı açma-kapama, ince kıyafetler giyme, ısıtma döneminde ise daha kalın kıyafet giyme yönünde tavırlar sergiledikleri belirlenmiştir. Eğitim yapıları iç mekan termal konforuna yönelik bir çok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Farklı iklim bölgelerinde yapılan bu araştırmaların kıyaslama ve değerlendirme yapma açısından önemi büyüktür. Okul yapıları enerji verimliliği, fiziksel konfor şartları ve öğrenme sürecini iyileştirme esasına göre tasarlanmalıdır. Bu anlamda ilgili binalarda pasif özellikler dahil edilerek minimum miktarda enerji kullanmak ve ilgili yapıları sürdürülebilir kılmak hem enerji verimliliği hem de konfor açısından faydalı olacaktır. Çalışma kapsamında Türkiye'nin soğuk iklim bölgesindeki okullarda uyarlanabilir termal konfor alanında bir örnek ortaya konulmuştur. Mevcut çalışmanın gelecekte yapılacak benzer çalışmalara referans olacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKÇA

- Altıntaş E. (2008) Termal Konfor Duyarlılık Ölçeğine Göre İlköğretim Dersliklerinin Termal Konfor Açısından Değerlendirilmesi. Master Thesis), Karadeniz Technical University, Trabzon.
- Amorim PRdS. (2007) Energy expenditure and physical activity patterns in children: applicability of simultaneous methods. Queensland University of Technology.
- Aparicio-Ruiz P., Barbadilla-Martin E., Guadix J., (2021) A field study on adaptive thermal comfort in Spanish primary classrooms during summer season. *Building and Environment* 203: 108089.
- ASHRAE-Handbook. (1989) Physiological Principles: Comfort and Health.
- ASHRAE-Standart-55. (2013) ASHRAE Standard 55 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy(ANSI Approved), Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).
- Bluyssen, P.M. Health, Comfort and Performance of Children in Classrooms—New Directions for Research. *Indoor Built Environ.* 2016, 26, 1040–1050.
- Bluyssen, P.M.; Zhang, D.; Kurvers, S.; Overtom, M.; Ortiz-Sanchez, M. Self-Reported Health and Comfort of School Children in 54 Classrooms of 21 Dutch School Buildings. *Build. Environ.* 2018, 138, 106–123.
- Corgnati S.P., Ansaldi R. ve Filippi M. (2009) Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons: Assessment through objective and subjective approaches. *Building and Environment* 44: 785-792.
- Chen X., Yang H. ve Sun K. (2016) A holistic passive design approach to optimize indoor environmental quality of a typical residential building in Hong Kong. *Energy* 113: 267-281.
- Choi J-H. ve Yeom D. (2019) Development of the data-driven thermal satisfaction prediction model as a function of human physiological responses in a built environment. *Building and Environment* 150: 206-218.
- Çulun, P. , Kürüm Varolgüneş, F. , Özer, G. & Kılınç, C. (2022). Thermal Comfort Comparison of Different Dwelling Typologies . *İDEALKENT* , 13 (38) , 2677-2701 . DOI: 10.31198/idealkent.1133752.
- De Dear R. ve Schiller Brager G. (2001) The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *International journal of biometeorology* 45: 100-108.
- De Oliveira C.C., Rupp R.F. ve Ghisi E. (2020) Influence of Air Movement and Air Humidity on Thermal Comfort in Office Buildings in Florianópolis, Brazil. 35th PLEA Conference-Sustainable Architecture and urban Design: Planning Post Carbon Cities.



- Fanger P.O. (1970) Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
- Fantozzi, F.; Hamdi, H.; Rocca, M.; Vegnuti, S. Use of Automated Control Systems and Advanced Energy Simulations in the Design of Climate Responsive Educational Building for Mediterranean Area. *Sustainability* 2019, 11, 1660.
- Halıcı F. (2019) kalorifer ve havalandırma tesisatı ısı yalıtımı ve örnek proje, Birsen yayınevi, İstanbul.
- Havenith G., Holmér I. ve Parsons K. (2002) Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. *Energy and Buildings* 34: 581-591.
- Humphreys M.A., Nicol J.F. ve Raja I.A. (2007) Field studies of indoor thermal comfort and the progress of the adaptive approach. *Advances in building energy research* 1: 55-88.
- ISO EI. (2001) Ergonomics of the Thermal Environment—Instruments for Measuring Physical Quantities, International Standardisation Organisation, Brussels.
- Kim J. ve de Dear R. (2018) Thermal comfort expectations and adaptive behavioural characteristics of primary and secondary school students. *Building and Environment* 127: 13-22.
- Kwong Q.J., Adam N.M. ve Sahari B. (2014) Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review. *Energy and Buildings* 68: 547-557.
- Lamberti, G.; Fantozzi, F.; Salvadori, G. Thermal Comfort in Educational Buildings: Future Directions Regarding the Impact of Environmental Conditions on Students' Health and Performance. In *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, Madrid, Spain, 9–12 June 2020; pp. 1–6.
- Mendell, M.; Heath, G. Do Indoor Pollutants and Thermal Conditions in Schools Influence Student Performance? A Critical Review of Literature. *Indoor Air* 2005, 15, 27–52.
- Metz Jane A., Finn A. (2015) Influenza and humidity e Why a bit more damp may be good for you!, *Journal of infection*, 71 pp.54-58.
- Mishra, A.K.; Ramgopal, M. Thermal Comfort Field Study in Undergraduate Laboratories—An Analysis of Occupant Perceptions. *Build. Environ.* 2014, 76, 62–72.
- Nagano K. and Mochida T. (2004). Experiments on thermal environmental design of ceiling radiant cooling for supine human subjects. *Building and Environment*, 39, 267-275.

- Özdamar M. ve Umaroğulları F. (2017) Bir Ofis Yapısı Örneğinde Isıl Konfor ve İç Hava Kalitesinin İncelenmesi. Megaron 12.
- Peeters L., De Dear R., Hensen J. (2009) Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. Applied Energy 86: 772-780.
- Rodríguez C.M., Coronado M.C. ve Medina J.M. (2021) Thermal comfort in educational buildings: The Classroom-Comfort-Data method applied to schools in Bogotá, Colombia. Building and Environment 194: 107682.
- Shaman J., Pitzer Virginia E., Viboud Cecile , Grenfell B. T., Lipsitch M. (2010) Absolute humidity and the seasonal onset of influenza in the continental United States, 8 (2) e1000316.
- Teli D., Jentsch M.F. ve James P.A. (2012) Naturally ventilated classrooms: An assessment of existing comfort models for predicting the thermal sensation and preference of primary school children. Energy and Buildings 53: 166-182.
- Trebilcock M., Soto-Muñoz J., Yañez M. (2017) The right to comfort: A field study on adaptive thermal comfort in free-running primary schools in Chile. Building and Environment 114: 455-469.
- Türk Standardı TSE 825, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, 2013, Ankara.
- Wang Z. (2006) A field study of the thermal comfort in residential buildings in Harbin. Building and Environment 41: 1034-1039.
- Yaman karadeniz R., Horuz İ., Coşkun S., Kaynaklı Ö, Yamankaradeniz N. (2015) iklimlendirme esasları ve uygulamaları, 3. Baskı, Bursa.
- Yang B., Olofsson T., Wang F. (2018) Thermal comfort in primary school classrooms: A case study under subarctic climate area of Sweden. Building and Environment 135: 237-245.
- Yılmaz Z. (2006) Akıllı binalar ve yenilenebilir enerji. Tesisat Muhendisligi Dergisi,(91): 7-15.

# Bölüm 9

## MAKİNE ÖĞRENMESİNDEKİ DOĞRUSAL REGRESYON MODELLERİNİN İNCELENMESİ

*Yunus DEMİR<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr. Öğretim Üyesi Yunus DEMİR

ORCID: 0000-0003-3868-1860

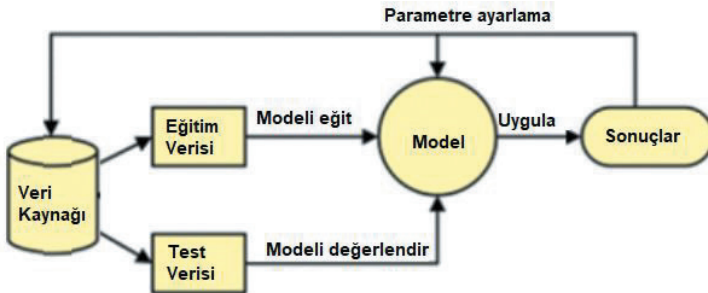
Bursa Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü

## 1. Giriş

Yapay zekâ (*Artificial Intelligence- AI*), yaygın olarak akıllı davranış olarak adlandırılan faaliyetlerin sayısal olarak anlaşılmasıyla ve bu tür davranışlar sergileyen araçların geliştirilmesi ile ilgilenen bir bilim ve mühendislik alanı olarak tanımlanır (Shapiro, 1992). Yapay zekâ (YZ) araştırmacıları, otuz yıldan beri mühendislik problemlerini çözmek için yeni teknikler geliştirmiş ve uygulamıştır. Bu tekniklerden biri olan makine öğrenmesi (MÖ), ağırlıklı olarak, dijital arenada büyük ilgi gören dijitalleşme çözümlerinin önemli bir bileşenidir (Ray, 2019). MÖ, sistemlere açıkça programlanmadan verilerden öğrenme ve iyileştirme yeteneği sağlar. Özellikle deneysel verilerden net bir denklemin çıkarılmadığı uygulamalar için kullanılır (Seçkin ve diğer., 2019). En genel tanımı ile MÖ, bilgisayar sistemlerinin açıkça programlanmadan belirli bir görevi gerçekleştirmek için kullandığı algoritmalar ve istatistiksel modellerin bütünüdür (Mahesh, 2020). Bu algoritmalar, veri madenciliği, görüntü işleme, tahmine dayalı analitik vb. gibi çeşitli amaçlar için kullanılır. Makine öğrenimini kullanmanın temel avantajı, bir algoritmanın verilerle ne yapacağını öğrendiğinde işini otomatik olarak yapabilmesidir (Mahesh, 2020).

Algoritma prosedürü temelinde, MÖ teknikleri, denetimli öğrenme (*supervised learning*), denetimsiz öğrenme (*unsupervised learning*), yarı denetimli (*semi-supervised learning*) öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme (*reinforcement learning*) olmak üzere dört temel sınıfa ayrılmaktadır (Jain ve diğer., 1999; Dutton ve Conroy, 1997). Bu çalışmada denetimli öğrenme konusuna odaklanılmıştır.

Denetimli öğrenme, regresyon ve sınıflandırma problemleri olarak gruplandırılabilir. Hedef değişken "yeşil", "kırmızı" ve "mavi" gibi bir kategorik değişken olduğunda, problem sınıflandırma olarak adlandırılır. Hedef değişken, "sıcaklık" veya "ağırlık" gibi sürekli bir değer olduğunda, problem regresyon olarak tanımlanır (Seçkin ve diğer., 2019). Denetimli makine öğrenmesi algoritmalarının işleyişi aşağıda verilmiştir (Mahesh, 2020):



Şekil 1. Denetimli öğrenme algoritmaları iş akışı

Bu çalışmada, doğrusal regresyon modelleri, alt başlıklar halinde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Öncesinde makine öğrenmesine ait temel kavramlara yer verilmiştir.

## 2. Makine Öğrenmesine İlişkin Temel Kavramlar

### 2.1. Yorumlanabilirlik (*Interpretability*) ve Doğruluk (*Accuracy*)

Bir modelin kalitesinin değerlendirme kriterleri, koşullara göre farklılık göstermektedir. Tipik olarak aşağıdaki iki nokta önemlidir (Zou ve Hastie, 2003):

- Gelecekteki veriler üzerinde tahminin doğruluğu
- Modelin yorumlanması: Yanıt ve ortak değişkenler arasındaki ilişkilere daha fazla ışık tuttuğu için daha basit bir model tercih edilir.

Tahmin doğruluğu: Doğruluk, bir modelin doğru tahminler yapma yeteneğidir (Johansson ve diğer., 2011). Tahmin modellerin sağladığı doğruluk içinde bulundukları duruma göre değişmektedir. Değişkenler arasındaki ilişki doğrusal ise ve bağımsız değişkenlerin sayısı örneklem büyüklüğünden çok daha az ise, o zaman düz OLS (*Ordinary Least Squares*) tahmin edicisinin iyi sonuçlar vermesi muhtemeldir. Buna karşın bağımsız değişkenlerin sayısı örneklem büyüklüğünden az ise, OLS tahminleri yüksek varyansa, düşük doğruluğa sahip olacak ve OLS prosedürü tek bir çözüm vermeyecektir. Bu olumsuzluğu gidermek için kullanılan düzenleme teknikleri genellikle, hafif bir sapma getirme pahasına tahmin varyansını azaltmaya izin verir. Sonuç olarak, tahmin doğruluğunu artırır. (Melkumova ve Shatskikh, 2017).

Model yorumlanabilirliği: Gilpin ve diğer. (2018) yorumlanabilirliği şu şekilde tanımlamıştır: “Bir insanın anlayabileceği terimlerle yorumlar sağlama kapasitesidir”. Çoğu zaman, regresyon modelinde bağımlı değişkeni etkilemeyen çok sayıda bağımsız değişken bulunmaktadır. Bu değişkenlerin modelden çıkarılması yorumlamayı kolaylaştırır. Bu doğrultuda, regresyon modelindeki bağımsız değişken sayısını azaltmayı amaçlayan “alt küme seçimi” teknikleri geliştirilmiştir (RR, Lasso, ElasticNet). Bu yöntemler katsayı tahminlerinin sifıra yakın (veya sifıra eşit) olduğu doğrusal modeller üretmektedirler (Melkumova ve Shatskikh, 2017).

### 2.2. Yanlılık (*Bias*), Varyans (*Variance*), İndirgenemez Hata (*Irreducible Error*)

Yanlılık, varyans ve indirgenemez hata (gürültü), tahmine dayalı öğrenme modellerinin genelleştirilmesini anlamak için temel unsurlardır.

Yanlılık, model sınıfı ile temel alınan veri dağılımı arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanan bir hata terimidir ve modelin karmaşıklığının bir fonksiyonu olarak genelde monoton bir şekilde artmaz (Yang ve diğer., 2020). Başka bir deyişle, bir model yalnızca birkaç örnek işlevi öğrenebiliyorsa bu yüksek yanlı bir modeldir. Model bunun yerine birçok işlevi öğrenebiliyorsa, düşük yanlı bir modeldir. Yüksek yanlılık, hedef fonksiyon hakkında birçok varsayımda bulunarak modeli basitleştirir ve uyumu daha az hesaplama yoğun hale getirir. (Versloot, 2022). Modelin eksik öğrenme (*underfitting*) durumuna düştüğünün göstergesidir. Eksik öğrenme durumunda yetersiz bağımsız değişken sebebiyle model yeni verileri genelleştiremez (Akdağlı, 2021). Yüksek yanlı modeller: doğrusal regresyon, lojistik regresyon, doğrusal sınıflandırma, doğrusal sinir ağları, doğrusal SVM'ler

Düşük yanlı modeller: doğrusal olmayan sinir ağları, doğrusal olmayan Destek Vektör Makineleri, karar ağaçları (Versloot, 2022).

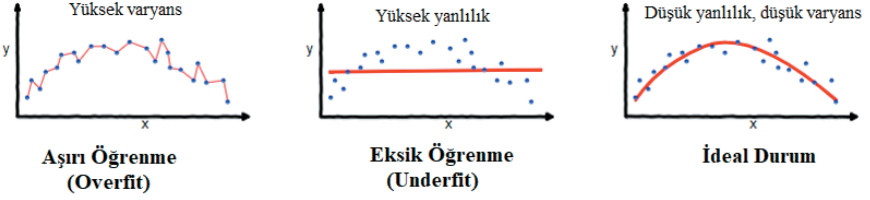
Varyans, eğitim setindeki dalgalanmalara duyarlılığı ölçer ve genellikle modelde çok sayıda bağımsız değişken olması ile ilişkilendirilir. Genel kanaat model karmaşıklığı ile doğru orantılı olarak model varyansının arttığı ve yanlılığın azaldığı yönündedir (Geman ve diğer., 1992). Bu durumda model eğitim verisindeki düşük değişimlere aşırı duyarlıdır ve yüksek varyans aşırı öğrenmenin (*overfitting*) göstergesidir. Bu da modelin fazla genel olduğunu gösterir (Akdağlı, 2021).

Düşük varyanslı modeller: doğrusal regresyon, lojistik regresyon, doğrusal sınıflandırma, doğrusal sinir ağları, doğrusal SVM'ler

Varyansı yüksek modeller: doğrusal olmayan sinir ağları, doğrusal olmayan Destek Vektör Makineleri, karar ağaçları (Versloot, 2022).

Yanlılık ve Varyans ödünleşmesi (ilişkisini) bir modelin eksik ve fazla öğrenmeyi dengelemesi gerektiğini ifade eder. Başka bir deyişle modelin verilerdeki temel yapıyı ifade edecek kadar zengin ve sahte kalıplara uymaktan kaçınacak kadar basit olmasının göstergesidir (Versloot, 2022). Sebastian Raschka tarafından geliştirilen mlxtend kitaplığı, bir model için yanlılık ve varyansı tahmin edebilen “*bias\_variance\_decomp()*”<sup>1</sup> fonksiyonu sunmaktadır. Yanlılık ve Varyans ödünleşmesi (ilişkisini) ifade etmek için literatürde aşağıdaki şekil sıklıkla kullanılmaktadır:

<sup>1</sup> [https://rasbt.github.io/mlxtend/user\\_guide/evaluate/bias\\_variance\\_decomp/](https://rasbt.github.io/mlxtend/user_guide/evaluate/bias_variance_decomp/)



Şekil 2. Varyans yanlılık ilişkisi<sup>2</sup>

İndirgenemez hata, model hatasının yanlılık veya varyans ile açıklanamayan kısmıdır. Modelleme ile kaldırılamayan hatadır. Gözlemlerdeki istatistiksel gürültü gibi kontrolümüz dışındaki unsurlardan kaynaklanır (Kuhn ve Johnson, 2013). Bu hatanın miktarını azaltmak için verinin temizlenmesi gerekmektedir (Akdağlı, 2021).

### 3. Regresyon Modelleri

Bir denetimli öğrenme yaklaşımı olan regresyon, sürekli değişkenleri modellemek ve tahminleri yapmak için kullanılır. En temel amaç, bağımlı değişkeni en iyi açıklayan, en uygun sayıda bağımsız değişkenle tahmin modeli elde edilmesidir (Alpar, 2017). Regresyonda etiketlenmiş veri kümeleri (*labeled datasets*) ile bağımlı değişken değeri, bağımsız değişken değerleri tarafından belirlenir. Bu çalışmada bağımlı bir değişken ile bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki bulan doğrusal regresyon modelleme yaklaşımlarına odaklanılmıştır. Bu kapsamda en temel doğrusal regresyon algoritmalarından olan basit doğrusal regresyon, çok değişkenli regresyon, lojistik regresyon, temel bileşen regresyonu, kısmi en küçük kareler regresyonu, ridge regresyonu, lasso regresyonu ve elasticNet regresyonu tanıtılmıştır.

### 4. Doğrusal Regresyon Modelleri

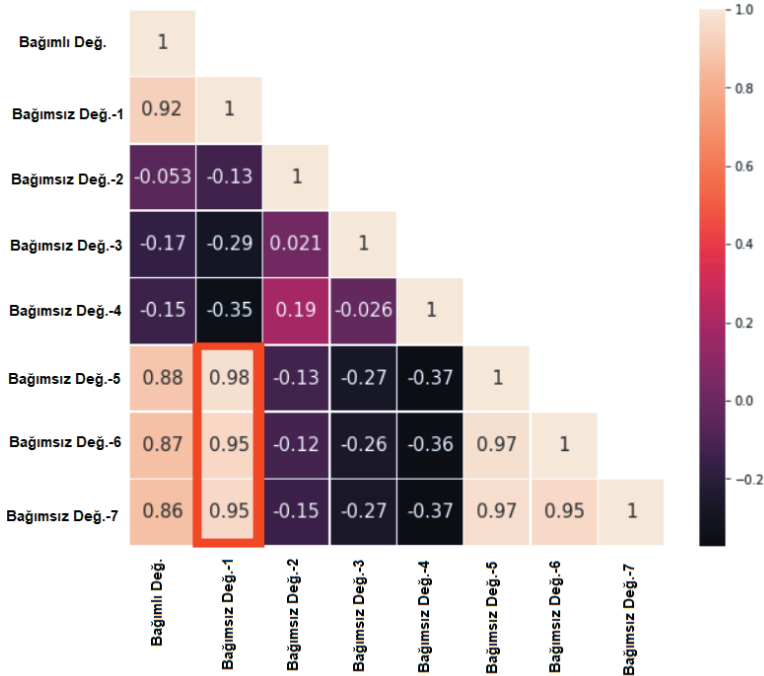
En temel regresyon yöntemleri, değişkenler arasında yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki olduğunu varsayan, kolayca yorumlanabilen doğrusal regresyon modelleridir (Lingitz et al. 2018). Başka bir tanımlama ile veri kümesine düz bir çizgi (*straight hyperplane*) sığdırmaya çalışılan ve veri kümesinin değişkenleri arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu durumlarda kullanılması mümkün olan regresyon tipidir (Ray 2019). Modellerde, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel bir şekilde ifade edilmeye çalışır.  $Y_i$  bağımlı değişken,  $\beta_i$  regresyon katsayıları,  $X_i$ 'lerin bağımsız değişkenleri ve  $p$  özellik sayısı ifade ettiği doğrusal regresyon modelleri Eşitlik 1'de gösterildiği gibidir: (Yıldırım ve Çiftçi, 2021).

<sup>2</sup> <https://nancyanyu.github.io/posts/6bd38994/>

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (1)$$

**Basit doğrusal regresyon** modeli, tek bir bağımsız değişken tarafından yönlendirilen bir bağımlı değişkene sahiptir. Ancak gerçek hayat problemleri daha karmaşıktır. Genellikle bir bağımlı değişken birden fazla faktöre bağlıdır. **Çok değişkenli regresyon** olarak bilinen bu yöntemle şöyle bir örnek verilebilir: Bir evin fiyatı, bulunduğu semt, bulunduğu bölge, oda sayısı, ek tesisler, en yakın istasyonun/havaalanının uzaklığı, en yakın alışveriş bölgesinin uzaklığı gibi birçok faktöre bağlıdır. Görüldüğü gibi çoklu doğrusal regresyonda, bir dizi bağımsız (girdi) değişken ile bir bağımlı (çıkıtı) değişken arasında bir ilişki bulunmaktadır (Ray, 2019).

Daha fazla bağımsız değişken eklemek, regresyonun daha iyi olacağı veya daha iyi tahminler sunacağı anlamına gelmez. Bazı durumlarda, daha fazla bağımsız değişkeni eklemek, aşırı öğrenmeye sebep olacağı için işleri daha da kötüleştirebilir. Daha fazla bağımsız değişkeni eklendikçe değişkenler arasında ilişkiler oluşur. Bu duruma çoklu bağlantı (*multicollinearity*) denmektedir. İdeal olan, tüm bağımsız değişkenlerinin, bağımlı değişken ile ilişkilendirilmesi, ancak birbirleriyle ilişkilendirilmemesidir (Ray, 2019).



Şekil 3. Örnek korelasyon matrisi (Langeni, 2022)



Çoklu bağlantı kavramını daha net açıklamak üzere Langeni (2022) tarafından hazırlanan örnek kullanılmıştır. Şekil 3'ten görüldüğü üzere, Bağımsız Değ.-1 ile Bağımsız Değ. 5, 6 ve 7 arasında güçlü bir doğrusal ilişki bulunmaktadır. Şüpheli olan bu durum, söz konusu değişkeni bir regresyon denkleminde bir tahmin edici olarak güvenilmez kılmaktadır. Söz konusu katsayının güven aralığı çok genişler ve bu, herhangi bir boş hipotezin reddedilmesini neredeyse imkânsız hale getirir. Çoklu bağlantıdan şüpheleniliyorsa, varyans şişirme faktörü (*variance inflation factor* - *VIF*) kullanılarak kontrol edilebilir. Bunun için bağımlı değişken, veri setinde kaldırılır. Her bağımsız değişken, diğer tüm bağımsız değişkenlere karşı regrese edilir. Elde edilen  $R^2$  değeri, aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi VIF'yi bulmak için kullanılır (Langeni, 2022):

$$VIF=1/(1-R^2) \quad (2)$$

Değişkenler birbirinden gerçekten bağımsız olduğundan,  $R^2$  çok küçük olacak ve VIF 1'e yaklaşacaktır. 5 ile 10 arasındaki bir VIF, çok yüksek düzeyde bir doğrusallık gösterir. Bu, sırasıyla 0,8 ve 0,9  $R^2$  değerlerine karşılık gelir. Genel uygulama,  $VIF>10$  olan her şeyin hariç tutulması gerekliliğidir. Yukarıda korelasyon matrisi (Şekil 3) verilen örnekteki bağımsız değişkenler birbirlerine karşı regrese edilmiş ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir:

**Tablo 1.** Her bağımsız değişken için VIF değeri

| Bağımsız değişkenler | 1      | 2     | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      |
|----------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| VIF                  | 68,027 | 1,054 | 1.1017 | 1,2138 | 33,264 | 20,268 | 17,823 |

5, 6 ve 7. Bağımsız değişkenler için bu kadar yüksek VIF değeri korelasyon matrisinde gözlemlenen durumu doğruluyor. Bu bağımsız değişkenler, bağımsız değişken 1 ile yüksek oranda ilişkilidir. Bu durumda, ilk akla gelen bu değişkenlerin modelden çıkarılması olabilir. Ancak bu durum kıymetli verinin kaybolmasına sebep olabilir. Bu durumla mücadele için geliştirilmiş tekniklere ilerleyen bölümlerde yer verilmiştir.

Çok değişkenli regresyon, bağımsız değişkenler seti ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiye ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki hakkında fikir verir. Buna karşın analiz sonucunda daha yüksek bir güven düzeyi elde etmek için örneklem boyutunun yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca bu tekniği uygulamak için istatistiksel teknikler ve istatistiksel modelleme konusunda bilgi ve uzmanlık gerekmektedir (Ray, 2019). Burada belirtilen temel iki doğrusal regresyon tekniğinin dışında diğer yaklaşımlar aşağıda incelenmiştir.

#### 4.1. Lojistik Regresyon

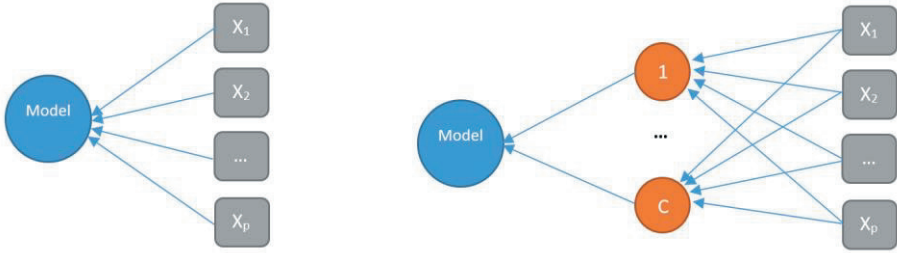
Doğrusal regresyon ile sürekli değişken değerlerinin tahmini ile ilgilenilmekteydi. Bağımlı değişkenin kategorik olduğu durumda tahmin için lojistik regresyon kullanılır. Bağımlı değişken 0,1 gibi ikili veya ikiden fazla seviye içeren kesikli yapıda ise normallik varsayımı bozulduğundan bu teknik, doğrusal regresyon analizine bir alternatiftir (Korkmaz ve diğer., 2012). Bağımsız değişkenlerinin değerlerine dayalı olarak bir olayın gerçekleşip gerçekleşmeyeceği sonucunu verir (binom sonucu/0-1). Örneğin, bir e-postanın spam olarak sınıflandırılıp sınıflandırılmadığını tahmin etmek (Ray, 2019). İsmine rağmen, regresyon modelinden çok bir sınıflandırma modeli olan lojistik regresyon, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenleri üzerindeki etkilerini olasılık olarak tahmin eder.

Avantajları şöyle sıralanabilir: Normal dağılım varyansı veya sürekli varyans gibi bir ön koşul yoktur. (Korkmaz ve diğer., 2012). Verilerdeki küçük gürültüden ve çoklu bağlantıdan etkilenmez. Giriş özellikleri için ölçeklendirme gerekmez. Buna karşın dezavantajları şöyle sıralanır: Doğrusal olmayan problemi çözemez, aşırı öğrenmeye meyillidir, tüm bağımsız değişkenler tanımlanmadıkça iyi sonuç vermemektedir. Lojistik Regresyonun bazı pratik uygulama örnekleri şunlardır: Belirli bir hastalığın ortaya çıkma riskini tahmin etme, kanser teşhisi, yaralı hastaların ölüm oranlarını tahmin etme ve belirli bir süreç, sistem veya ürünün başarısızlık olasılığını tahmin etmek (Ray, 2019). Bağımlı değişkenin türüne bağlı olarak, üç ana lojistik regresyon analizi yöntemi bulunmaktadır: (Korkmaz et al. 2012):

- İkili lojistik regresyon (*Binary logistic regression*),
- Sıralı lojistik regresyon (*Ordinal logistic regression*)
- Nominal lojistik regresyon (*Nominal logistic regression*).

#### 4.2. Temel Bileşen Regresyonu (*Principal Component Regression- PCR*)

TBR, çoklu bağlantı sorununu çözen ve bağımsız değişkenlerin doğrusal kombinasyonlarını oluşturarak bağımsız değişkenlerin sayısını azaltan çok yaygın bir boyut azaltma tekniğidir. Yanlı bir regresyon tekniği olan TBR'nin ana fikri, bağımlı değişkeni doğrudan bağımsız değişkenler üzerine regresyonlamak yerine, bağımsız değişkenlerin temel bileşenlerine indirgeyerek regresyon modeli oluşturmaktır (Kurnaz, 2020). Yöntemin genel işleyişi Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 4.** Çoklu doğrusal regresyon ile TBR karşılaştırması

Şekil 4'te görüldüğü gibi çoklu doğrusal değişken modeli tüm bağımsız değişkenlere (X) dayanır. Ancak TBR'de (ve takip eden bölümde açıklanacak KEKR) orijinal X bağımsız değişkenlerin birkaç doğrusal kombinasyonu (bileşenler) regresyon denkleminde dikkate alınır (Wold, 1984). Bu şekilde, alakasız ve kararsız bilgiler atılır ve regresyon için x-varyasyonunun sadece en alakalı kısmı kullanılır. Çoklu bağlantı problemi çözülür ve daha kararlı regresyon denklemleri elde edilir (Lopez ve diğer., 2014).

Temel Bileşen Analizi (TBA: *Principal Component Analysis-PCA*) ve sıradan en küçük kareler (ordinary least squares - OLS) tahmincisinin bir kombinasyonu olan TBT iki ayrı prosedür içerir. İlk aşamada TBA uygulanır. TBA'da çoklu bağlantı durumunda değişkenlerin karşılıklı olarak ilişkisiz olacak şekildi yeni girdi veri seti oluşturur. Yani burada yapılan işlem, özellik çıkarımı için denetimsiz öğrenme uygulamaktır (Fleming ve Garen, 2022). İkinci aşamada, elde edilen bu veri seti potansiyel tahmin ediciler olarak kullanan klasik doğrusal regresyon modellemesi yapılır. Yani özellik seçimi ve tahmine dayalı modelleme için denetimli öğrenme uygulanır (Fleming ve Garen, 2022).

#### **4.3. Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu (*Partial Least Squares-PLS*)**

Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu (KEKR), bağımsız değişkenler çok sayıda (gözlem sayısından bile fazla) ve yüksek oranda çoklu bağlantı olduğunda ve küçük veri kümeleriyle, eksik değerlerle tahmine dayalı etkili modeller oluşturmak için 1960'larda Wold (1966) tarafından geliştirilmiştir (Phatak ve Jong, 1997). Kısmi en küçük kareler regresyonu, yumuşak modelleme (*soft modeling*) veya gizli yapılara izdüşüm (*projection to latent structures*) olarak da adlandırılmaktadır (Abdi ve Williams, 2013; Pirouz, 2006). Yumuşatma ifadesinin kullanılmasının sebebi, sıradan en küçük kareler (*ordinary least squares-OLS*) regresyonu bağımsız değişkende çoklu bağlantı olmaması gibi katı varsayımlar yaparken, yumuşak modellemede bu kısıtlamanın gevşetilmiş olmasıdır (Pirouz, 2006). Çok sayıda ilişkili değişken ve sınırlı sayıda gözlem ile

büyük bir problemin olduğu, özellikle kimya ve kemometrik bilimlerde çok popüler olmuştur (Pirouz, 2006). Amaç regresyon probleminin boyutluluğunu azaltırken, tahmin için yararlı olan bağımsız değişkenlerindeki bilgilerin çoğunu yakalayan bileşenler oluşturmaktır (Garthwaite, 1994). Çoklu bağlantı durumunda regresyon katsayıları için sıradan en küçük kareler tahmin edicisinin çok kötü sonuçlar verebileceği bilinmektedir (Gunst ve Mason, 1979). Bu sorunun üstesinden gelmek için KEKR'in yansıra; TBR, ridge regresyonu (RR) gibi birçok yöntem geliştirilmiştir (Yeniay ve Göktaş, 2002). TBR ve RR, değişken sayısı fazla olduğunda büyük miktarda hesaplama gerektirir (Garthwaite, 1994). Ayrıca yapılan çalışmalar, KEKR 'nin minimum ortalama kare hatasına (MSE) TBR'den daha az sayıda faktörle ulaştığını göstermiştir (Yeniay ve Göktaş, 2002).

Y bağımlı değişkenlerini  $X_1, \dots, X_p$  bağımlı değişkenlerle regrese etmek için KEKR, X'lerle aynı rolü oynayacak yeni faktörler bulmaya çalışır. Bu yeni faktörlere gizli değişkenler (*latent variables*) veya bileşenler (*components*) denir. Her bileşen,  $X_1, \dots, X_p$ 'nin doğrusal bir kombinasyonudur. Bir model oluşturmak için gizli değişkenlerin sayısının seçimi önemli bir konudur (Li et al 2022). Y değişkenleri ile regresyona girecek bazı faktörlerin bulunmaya çalışılması TBR ile benzeşen yönüdür (Şekil 3). Ancak TBR yeni faktörler oluşturmak için yalnızca X varyasyonunu kullanırken KEKR, yeni faktörler oluşturmak için hem X hem de Y varyasyonunu kullanır (Yeniay ve Göktaş, 2002).

#### 4.4. Ridge Regresyonu

Çoklu bağlantı problemini halletmek için önceki iki teknik mevcut bağımsız değişkenlerin kombinasyonundan oluşan daha az sayıda değişken seti ile tahmin modelinin oluşturulması prensibine dayanmaktaydı. Ancak bu ve takip eden başlıklar altında izah edilecek yöntemler cezalandırma prensibine dayanmaktadır. Bu modellere küçültme/daraltma modelleri (*Shrinkage models*) de denmektedir (Fidanoğlu ve Akdeniz, 2010).

Ridge Regresyon (RR) (Tikhonov regresyonu diye de adlandırılır), çoklu doğrusal regresyonda sıklıkla ortaya çıkan çoklu bağlantı problemini ele almak için kullanılan yanlı bir parametre tahmin yöntemidir. Hoerl ve Kennard (1970) tarafından geliştirilmiştir.

En küçük kareler (EKK) yöntemi, çoklu doğrusal regresyon modellerinde parametre tahmini için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde hatalar kareler toplamını (*sum of square error-SSE*) minimum yapan parametre tahmincilerinin seçimi yapılır. Hata kareleri toplamının (HKT) matematiksel gösterimi aşağıda verilmiştir ( $n$ : gözlem sayısı,  $y_i$ : gerçek değer,  $\hat{y}$ : tahmini değer):

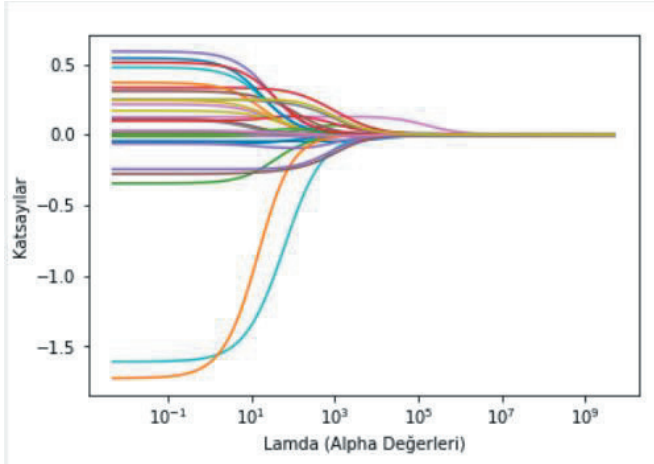
$$HKT = \sum_1^n (y_i - \hat{y})^2 \quad (5)$$

Ancak en küçük kareler yönteminin uygulanabilmesi için birtakım varsayımların yerine getirilmiş olması gerekmektedir (Büyükıysal ve Öz, 2016). Model varsayımlarının geçerli olması durumunda en küçük kareler yöntemi tahminleri yansız ve en küçük varyansa sahip tahmin edicidir. Aksi takdirde, regresyon katsayılarının tahminlerinin varyansının büyük olmasına ve buna bağlı olarak istatistiksel çıkarımların yanlış sonuçlar üretmesine neden olmaktadır (Pfaffenberger ve diğer., 1990). RR, modelde korelasyonlu tahmin değişkenlerinin varlığında gerçek değerlere oldukça yakın olan regresyon parametrelerinin yanlı tahminine izin veren bir regresyon tekniğidir (Yahya ve Olaifa, 2014). RR tahminlerine bir derece sapma ekleyerek, varyansları azaltır. Modelin daha güvenilir tahminler vermesini sağlayan bu özelliği ile en küçük kareler yöntemine tercih edilebileceği söylenir (Topla ve diğer., 2010)

RR, orijinal bağımsız değişkenler setinde, değişkenleri çıkarmadan çoklu bağlantı probleminin çözmenin bir yolunu sağlamaktadır. Bunun için, bir skaler negatif olmayan parametre tarafından indekslenen bir yanlı tahmin ediciler seti oluşturur. RR'ye ait hata kareleri toplamının matematiksel gösterim şu şekildedir:

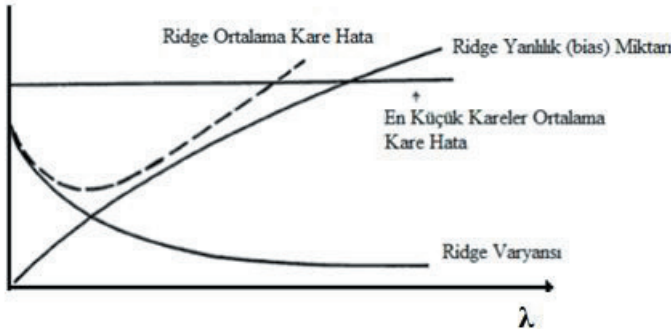
$$HKT_{L2} = \sum_1^n (y_i - \hat{y})^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^r \quad (6)$$

L2 ile ifade edilen düzenlileştirme normunu ifade etmektedir. Buradaki kritik öneme sahip olan nokta, ridge parametresi ( $\lambda$ ) için en iyi seçimi belirlemektir (McDonald, 2009).  $\lambda = 0$  seçildiğinde RR, doğrusal regresyona dönüşür. Eğer  $\lambda$  çok büyükse, tüm ağırlıklar sıfıra çok yakın olur ve sonuç, verilerin ortalamasından geçen düz bir çizgi halini alır. (Aytekin, 2021).  $\lambda$  değerine bağlı olarak bağımsız değişken katsayılarındaki değişimi ifade eden bir görsel Şekil 5'te paylaşılmıştır.



Şekil 5.  $\lambda$  değerine karşılık model katsayılarındaki değişim

Bu parametrenin varyans, yanlılık ve ortalama kare hata üzerindeki etkisi Şekil 6'da gösterilmiştir (Büyükuysal, 2010):



Şekil 6. Ridge parametresi ( $\lambda$ ), varyans, yanlılık ilişkisi

Şekil- 6'da görüldüğü üzere en küçük kareler varyansı hata kareler ortalamasına eşittir (üst üstedir) ve  $\lambda$ 'dan etkilenmediği için yatay doğru ile temsil edilmiştir. Ayrıca,  $\lambda$  artarken ridge varyansı azalmakta, yanlılık miktarı artmaktadır. Şekil 4 üzerinde kesikli çizgi ile temsil edilen ridge tahmin yönteminin hata kareler ortalaması, optimal bir  $\lambda$ 'da minimum değeri almaktadır (Büyükuysal, 2010). Bu yaklaşımın dezavantajı, katsayıları sıfıra doğru küçültür (0 yapmaz) ve dolayısıyla özellik seçimi yapamaz ve nihai modeldeki tüm bağımsız değişkenleri içermektedir. Bu da modelin yorumlanabilirliğini düşürmektedir. (Aytekin, 2021).

#### 4.5. En Küçük Mutlak Küçülme ve Seçim Operatörü Lasso Regresyonu (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)

Tibshirani (1996) tarafından geliştirilen LASSO regresyonu istatistiksel öğrenmede önemli roller oynayan cezalı tahminler sınıfındandır. Ridge regresyonda olduğu gibi hata kareleri toplamını minimize eden katsayıları, bu katsayıları ceza uygulayarak bulmayı amaçlar (Tibshirani 1996). Bunun için L1 düzenleme normunu kullanır. Lasso regresyonuna ait hata kareleri toplamının matematiksel gösterim şu şekildedir:

$$HKT_{L1} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \quad (7)$$

Cezalı tahminin, tahmin edicinin sıfır olmayan elemanları üzerindeki küçültme/daraltma (*shrinkage*) etkisinden yüksek tahmin doğruluğu sağladığı ve uygun model yeterince seyrek olduğu için yorumlanabilirliği arttırdığı bilinmektedir (Tibshirani, 1996). Bununla birlikte, cezalı tahminin en önemli özelliği, ilgilenilen parametrenin boyutunun örneklem boyutundan çok daha büyük olduğu durumda, model yüksek boyutlu olduğunda bile cezalı tahminin uygulanabilmesidir (Kwon ve diğer. 2013). Örneğin, gen ekspresyonu verilerindeki önemli genleri tespit etmek, bağımsız değişkenler olarak binlerce geni içerdiklerinden genellikle yüksek boyutlu modeller gerektirir (Dudoit ve diğer., 2002; Lee ve Lee, 2012).

RR, nihai modeldeki tüm bağımsız değişkenleri içermektedir. Buna karşın, Lasso regresyonu en az önemli özelliklerin ağırlıklarını tamamen ortadan kaldırma (yani, onları sıfıra ayarlama) eğilimindedir. Diğer bir deyişle, Lasso regresyonu aynı zamanda özellik seçimi yapmaktadır (Aytekin, 2021). Lasso Regresyonu, işe yaramaz değişkenleri modelden hariç tutabildiğinden, varyansı azaltma konusunda RR'den daha iyidir. Buna karşılık, RR, çoğu değişken yararlı olduğunda Lasso Regresyonundan daha iyi sonuç vermektedir. (Aytekin, 2021).

#### 4.6. ElasticNet

Sıradan en küçük kareler (OLS) tahminleri, HKT'yi en aza indirerek elde edilir. OLS'nin genellikle hem tahminde hem de yorumlamada başarısız olduğu iyi bilinmektedir. RR ve Lasso gibi diğer doğrusal regresyon türleri OLS'de iyileştirmek için geliştirilmiştir. Her iki yöntem yanlılık-varyans değiş ödünleşmesi yoluyla daha iyi tahmin performansına ulaşmaya çalışır.

RR, katsayıları L2 normunu uygulayarak HKT'yi en aza indirmeye çalışır. Bunu yaparak, sırt RR, regresyonu katsayılarını sürekli olarak sıfıra doğru küçültmeyi amaçlar. Her zaman tüm bağımsız değişkenleri modelde tutar (Zou ve Hastie, 2003).

Lasso'da ise, katsayıları L1 normuna uygulayarak HKT'yi en aza indirilir. L1 cezasının doğası gereği, Lasso aynı anda hem küçültme/daraltma hem de otomatik değişken seçimi yapar. Dolayısıyla Lasso, hem RR hem de en iyi alt küme seçebilme gibi bazı iyi özelliklere sahiptir. Lasso birçok durumda başarı göstermiş olsa da, bazı sınırlamaları vardır. Aşağıdaki üç senaryoyu göz önünde bulundurun (Zou ve Hastie, 2003):

- Bağımsız değişken sayısı gözlemlerin sayısından büyükse Lasso iyi tanımlanmaz. Ayrıca, dışbükey optimizasyon probleminin doğası gereği en fazla gözlem sayısı kadar değişken seçer. Bu, bir düzenleme yöntemi için sınırlayıcı bir özelliktir.
- Aralarında çoklu bağlantı olan bir değişken grubu varsa bağlantı çok yüksekse, Lasso gruptan yalnızca bir değişken seçme eğilimindedir ve hangisinin seçildiğiyle ilgilenmez.
- Gözlem sayısının bağımsız değişkenden büyük olduğu durumlar için, bağımsız değişkenler artasında arasında yüksek korelasyonlar varsa, RR'nin performansı Lasso'yu geçmektedir.

ElasticNet (Enet), RR ve Lasso arasında bir köprü sağlayan, katsayıların hem L1 hem de L2 düzenlileştirme normu ile eğitildiği doğrusal bir regresyon modelidir doğrusal regresyon yaklaşımıdır (Scikit-Learn, 2020; Hans, 2011). Büyük balıkları kaçırmayan bir ağ gibi davrandığından bu ismi almıştır (Zou ve Hastie, 2003). Hata kareleri toplamının matematiksel gösterim şu şekildedir:

$$HKT_{Enet} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 + \lambda_1 \sum_{j=1}^p \beta_j^r + \lambda_2 \sum_{j=1}^p |\beta_j| \quad (8)$$

Yapılan çalışmalar, ElasticNet'in, Lasso'ya tahmin doğruluğu açısından önemli ölçüde üstünlük sağladığını göstermiştir. ElasticNet, mikrodizi veri analizi için özellikle öne çıkmaktadır. (Zou and Hastie 2003).



## KAYNAKÇA

- Abdi, H., & Williams, L. J. (2013). Partial least squares methods: partial least squares correlation and partial least square regression. In *Computational toxicology* (pp. 549-579). Humana Press, Totowa, NJ.
- Akdağlı Ece, 2021, <https://ece-akdagli.medium.com/makine-%C3%B6%C4%9Freniminde-varyans-ve-yanl%C4%B1l%C4%B1k-nedir-d29c3c7bbd88>
- Alpar R. Çoklu Doğrusal Regresyon. İçinde: Alpar R. Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemler.5.Baskı. Ankara: Detay Yayıncılık; 2017: 399-400.
- Aytekin, H. T. Makine Öğreniminin Araştırmacıların Veri Analizi Bağlamında Potansiyel Önemi. *Ufuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 10(19), 85-106.
- Büyükuysal, M. Ç., & Öz, İ. İ. (2016). Çoklu doğrusal bağıntı varlığında en küçük karelere alternatif yaklaşım: Ridge regresyon. *Düzce Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 110-114.
- Dutton M. and G.V. Conroy, "A review of machine learning," *The Knowledge Engineering Review*, vol. 12, pp. 341-367, 1997.
- Fidanoğlu, I., & Akdeniz, F. İstatistiksel Daraltıcı (Shrinkage) Model Ve Uygulamaları.
- Fleming, S. W., & Garen, D. C. (2022). Simplified Cross-Validation in Principal Component Regression (PCR) and PCR-Like Machine Learning for Water Supply Forecasting. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*.
- Geman, S., Bienenstock, E., and Doursat, R. Neural networks and the bias/variance dilemma. *Neural computation*, 4(1):1–58, 1992.
- Garthwaite, P. H. An interpretation of partial least squares, *Journal of the American Statistical Association* 89, 122–127, 1994.
- Gilpin, L. H., Bau, D., Yuan, B. Z., Bajwa, A., Specter, M., & Kagal, L. (2018). Explaining explanations: An overview of interpretability of machine learning. In *2018 IEEE 5th International Conference on data science and advanced analytics (DSAA)*. IEEE (pp. 80–89).
- Gunst, R. F. and Mason, R. L. Some considerations in the evaluation of alternate prediction equations, *Technometrics* 21, 55–63, 1979.
- Hans, C. (2011). Elastic net regression modeling with the orthant normal prior. *Journal of the American Statistical Association*, 106(496), 1383-1393.
- Hoerl, A. E., & Kennard, R. W. (1970). Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics*, 12(1), 55-67.
- Jain, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1999). Data clustering: a review. *ACM computing surveys (CSUR)*, 31(3), 264-323.

- Johansson, U., Sönströd, C., Norinder, U., & Boström, H. (2011). Trade-off between accuracy and interpretability for predictive in silico modeling. *Future medicinal chemistry*, 3(6), 647-663.
- Korkmaz, M., Güney, S., & YİĞİTER, Ş. (2012). The importance of logistic regression implementations in the Turkish livestock sector and logistic regression implementations/fields. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 16(2), 25-36.
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). *Applied predictive modeling* (Vol. 26, p. 13). New York: Springer.
- Kwon, S., Han, S., & Lee, S. (2013). A small review and further studies on the LASSO. *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, 24(5), 1077-1088.
- Langeni, S.i 2022, <https://towardsdatascience.com/multicollinearity-83d3ec2c8acf>
- Li, B., Morris, J., & Martin, E. B. (2002). Model selection for partial least squares regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 64(1), 79-89.
- Lingitz, L., Gallina, V., Ansari, F., Gyulai, D., Pfeiffer, A., Sihn, W., & Monostori, L. (2018). Lead time prediction using machine learning algorithms: A case study by a semiconductor manufacturer. *Procedia Cirp*, 72, 1051-1056.
- Lopez, F., Ibarra-Castanedo, C., de Paulo Nicolau, V., & Maldague, X. (2014). Optimization of pulsed thermography inspection by partial least-squares regression. *Ndt & E International*, 66, 128-138.
- Mahesh, B. (2020). Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. [Internet], 9, 381-386.
- Melkumova, L. E., & Shatskikh, S. Y. (2017). Comparing Ridge and LASSO estimators for data analysis. *Procedia engineering*, 201, 746-755.
- Pfaffenberger, R. C., T. E. Dielman, A comparison of regression estimators when both multicollinearity and outliers, içinde: K. D. Lawrence, J. L. Arthur (Ed.) *Robust Regression: Analysis and applications*, Marcer Dekker Inc. New york and Basel, (1990) 243-270.
- Phatak, A. and Jong, S. D. The geometry of partial least squares, *Journal of Chemometrics* 11, 311–338, 1997.
- Pirouz, D. M. (2006). An overview of partial least squares. Available at SSRN 1631359.
- McDonald, G. C. (2009). Ridge regression. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 1(1), 93-100.
- Ray, S. (2019, February). A quick review of machine learning algorithms. In *2019 International conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon)* (pp. 35-39). IEEE.
- Seçkin, M., Seçkin, A. Ç., & Coşkun, A. (2019). Production fault simulation and forecasting from time series data with machine

- learning in glove textile industry. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14, 1558925019883462.
- Shapiro SC. Artificial intelligence. In: Shapiro SC. (ed) *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, vol. 1, 2nd edn. New York: Wiley, 1992.
- Tibshirani, R. J. (1996). Regression shrinkage and selection via the LASSO. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 58, 267-288.
- Topal, M., Eyduran, E., Yağanoğlu, A. M., SÖNMEZ, A., & Keskin, S. (2010). Çoklu doğrusal bağlantı durumunda ridge ve temel bileşenler regresyon analiz yöntemlerinin kullanımı. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 41(1), 53-57.
- Yang, Z., Yu, Y., You, C., Steinhardt, J., & Ma, Y. (2020, November). Rethinking bias-variance trade-off for generalization of neural networks. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 10767-10777). PMLR.
- Versloot C, <https://github.com/christianversloot/machine-learning-articles/blob/main/machine-learning-error-bias-variance-and-irreducible-error-with-python.md>
- Wold, H. (1966). Estimation of principal components and related models by iterative least squares. In P.R. Krishnaiah (Ed.). *Multivariate Analysis*. (pp.391-420) New York: Academic Press.
- Wold S, Martens H, Wold H. The Multivariate calibration problem in chemistry solved by the PLS method. In: *Conference Matrix Pencils*, Heidelberg, Germany; 1984.
- Yahya, W. B., & Olaifa, J. B. (2014). A note on ridge regression modeling techniques. *Electronic Journal of Applied Statistical Analysis*, 7(2), 343-361.
- Yeniay, Ö., & GÖKTAŞ, A. (2002). A comparison of partial least squares regression with other prediction methods. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 31, 99-111.
- Yıldırım, D. D., & Çiftçi, A. T. (2021). Etkili değişkenlerin cezalı regresyon yöntemleri ile belirlenmesi: Diyabet veri kümesi üzerine bir uygulama. *Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 14(1), 105-112.
- Zou, H., & Hastie, T. (2003). Regression shrinkage and selection via the elastic net, with applications to microarrays. *JR Stat Soc Ser B*, 67, 301-20.