

# MÜHENDİSLİKTE YENİ VİZYONLAR:

KAVRAMLAR - KURAMLAR - UYGULAMALAR



Editör: Prof. Dr. Meltem SARIOĞLU CEBECİ



# **MÜHENDİSLİKTE YENİ VİZYONLAR:**

**KAVRAMLAR - KURAMLAR - UYGULAMALAR**

**Editör**

**Prof. Dr. Meltem SARIOĞLU CEBECİ**



*Mühendislikte Yeni Vizyonlar:  
Kavramlar - Kuramlar - Uygulamalar  
Editör: Prof. Dr. Meltem SARIOĞLU CEBECİ*

**Genel Yayın Yönetmeni:** Berkan Balpetek  
**Kapak ve Sayfa Tasarımı:** Duvar Design  
**Yayın Tarihi:** EKİM 2024  
**Yayıncı Sertifika No:** 49837  
**ISBN:** 978-625-6183-27-8

© Duvar Yayınları  
853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir  
Tel: 0 232 484 88 68

[www.duvaryayinlari.com](http://www.duvaryayinlari.com)  
[duvarkitabevi@gmail.com](mailto:duvarkitabevi@gmail.com)

## İÇİNDEKİLER

1. Bölüm .....	5
<b>Dikdörtgen Rezonatörlü Plazmonik Sensör Kullanılarak Kırılma İndisine Bağlı Biyomolekül Algılama</b>	
<i>Ahmet Murat ERTURAN</i>	
2. Bölüm .....	20
<b>Konik Kırıcılarda Yapısal TasarımHususlarıve Optimum Koşullar</b>	
<i>Ali Kemal ÇAKIR</i>	
3.Bölüm .....	29
<b>Denizel Ortamlarda Oluşan Yumuşak Sediment Deformasyon Yapıları</b>	
<i>Calibe KOÇ TAŞGIN</i>	
4. Bölüm .....	53
<b>Bor ve Türevlerinin Asfalt Kaplamalarda Kullanılmasının Araştırılması</b>	
<i>Ersoy KABADAYI</i>	
5. Bölüm .....	65
<b>Taş Mastik Asfalt Kaplamalar</b>	
<i>Ersoy KABADAYI</i>	
6. Bölüm .....	78
<b>Mezogözenekli Kalsiyum Silikat Malzemelerin, Seryum ve Demir Yüklenimi ile Birlikte Katalitik Performansları ve İlaç Salım Özellikleri</b>	
<i>Fatma TOMUL, Filiz AKTI</i>	

7. Bölüm .....	93
<b>Bölüm Atık Sulardan Boyar Maddelerin Mezogözenekli Kalsiyum Silikat ile Adsorpsiyonu: İzoterm ve Kinetik Analizler</b> <i>Fatma TOMUL, Diğdem TRAK, Filiz AKTI</i>	
8. Bölüm .....	111
<b>Bilgisayarlı Tomografi ve Dikkat Edilmesi Gereken Konu: Tüp Voltajı</b> <i>Güneş AÇIKGÖZ</i>	
Bölüm 9 .....	126
<b>Farklı Tür Yağlayıcıların Tribolojik Özelliklerinin Nanopartikül Katkılarıyla İyileştirilmesi</b> <i>M.Salih GÜL, Tayyip ÖZDEMİR</i>	
10. Bölüm .....	135
<b>Bulanık Kümeleme ve Destek Vektörleri ile Sinir Ağı Güçlendirme Uygulamaları</b> <i>Nisa SARI, Mehmet ACI, Gizen MUTLU, Çiğdem ACI</i>	
11. Bölüm .....	149
<b>Uzman Modeller Topluluğu: Çok Sınıflı Problemlerde İşbirlikçi Çözüm Stratejisi</b> <i>Musa ATAŞ, Bashar ALHAJAHMAD</i>	

## 1. Bölüm

### Dikdörtgen Rezonatörlü Plazmonik Sensör Kullanılarak Kırılma İndisine Bağlı Biyomolekül Algılama

Ahmet Murat ERTURAN<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Araştırma Görevlisi, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-SElektronik Mühendisliği Bölümü, [amerturan@ktun.edu.tr](mailto:amerturan@ktun.edu.tr), ORCID No: 0000-0001-7328-644X.

## ÖZET

Biyosensörler ilaç inovasyonu, tıp, hastalık teşhisi, biyolojik ve çevresel izleme, gıda koruma ve güvenlik gibi birçok farklı alanda büyük bir öneme sahiptir. Hastalıkların, patojenlerin ya da protein gibi biyomoleküllerin tespitinde kullanılarak yüksek hassasiyet ve yüksek hızda tespit amaçlarlar. Geleneksel biyomoleküler algılama ve teşhis yöntemleri genellikle maliyetli ve hantal cihazlara bağımlıdır. Bunun yanı sıra gerçek zamanlı ölçüm yetenekleri sınırlıdır ve uzman laboratuvar ekibi gerektirirler. Bu dezavantajların üstesinden gelebilmek için metamalzeme tabanlı plazmonik biyosensörler önemli bir rol üstlenir. Çünkü plazmonik biyosensörler etiketsiz, gerçek zamanlı, düşük maliyetli ve yüksek hassasiyetli biyomoleküler algılama yeteneğine sahiptir. Bu avantajları sağlayan temel yöntem dalga boyu altı parçacıkların ışığı manipüle etme yetenekleriyle ortaya koyulur. Metal nanoparçacıklar ve dielektrik arayüz boyunca yayılan yüzey plazmonları yüksek hassasiyetli algılama için oldukça elverişlidir. Buna ek olarak meta-atomların geometrik şekil ve parametrelerine bağlı olarak geliştirilen rezonans modları elektromanyetik spektrumda ayarlanabilir ve biyomoleküllerin spektral parmak izleri tespit edilebilir. Bu çalışmada dikdörtgen nanoparçacıklardan oluşan bir plazmonik biyosensör önerilmiş ve bu sensörün biyo-algılama yeteneği kırılma indisi değişimi ile analiz edilmiştir. Ortamdaki kırılma indislerindeki değişiklikler hassas bir şekilde tespit edilmiş ve sensörün biyo-algılama yeteneği gösterilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Plazmonik sensör, metamalzeme, nanoparçacık, biyo-algılama.

## 1.GİRİŞ

Biyosensörler, biyolojik moleküllerin algılanmasını sağlayan analitik araçlardır (Lino ve diğ., 2022; Bhalla ve diğ., 2016). Bu moleküllerin algılanması analit içerisindeki konsantrasyona ve molekül türlerine bağlı olarak bir elektrik sinyali oluşturulmasıyla yapılır (Kulshreshtha ve diğ., 2017; Naresh ve Lee, 2021). Tıp, hastalık izleme, ilaç keşfi ve çevresel izleme gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılırlar (Xiao ve diğ., 2023; Elsayed ve diğ., 2024; Liu ve diğ., 2023). Biyomoleküler algılama için kullanılan analitler genellikle kan, idrar, tükürük ve ter gibi örnekler aracılığıyla gerçekleştirilebilir (Senf ve diğ., 2020). Son yıllarda literatürde oldukça popüler bir hale gelen plazmonik tabanlı biyosensörler bu biyomoleküler algılama sürecinde güçlü yanıtlar vermektedir (Nguyen ve diğ., 2023). Diğer biyosensör türlerine göre avantajları; gerçek zamanlı ölçüm yetenekleri, etiketsiz tespit yetenekleri, yeniden kullanılabilirlik, kısa tepki süresi ve basit uygulama kolaylığı gösterilebilir (Kim ve diğ., 2021; Soler ve Lechuga, 2021). İnvaziv yöntemlerle ölçümler alınabildiği gibi non-invaziv yöntemlerle elde edilen örneklerden de ölçümler gerçekleştirilebilir (Carrero-Ferrer ve diğ., 2022; Riedel ve diğ., 2017). Geleneksel biyomoleküler ölçüm sistemleri hantal cihazlar ve uzman laboratuvar ekibi gerektirir (Song ve diğ., 2023). Ancak plazmonik tabanlı biyosensörler sürekli tekrarlanabilir ve basit kullanıma sahiptir (Hill, 2014).

Plazmonik biyosensörler, metamalzeme tabanlı yapılardan oluşur ve temelde yüzey plazmonlarının yayılımı fenomenine dayalı olarak çalışır (Xu ve diğ., 2016). Yüzeğe gelen elektromanyetik dalgalar metallerle etkileşime girdiğinde serbest elektronların bir kolektif salınım yapmasını sağlar ve bu salınım yüzey plazmonu olarak isimlendirilir (Haky ve diğ., 2024). Bu yapılar negatif kırılma indisli davranış gösterir ve doğada var olmayan malzemelerin gösterebileceği optik tepkiler vermeyi sağlar (Waele ve di., 2010). Doğada var olmayan bu malzemeler metamalzeme olarak adlandırılırken, yapıları genellikle metal-dielektrik-metal katmanlarından oluşur. Elektromanyetik dalganın bu metal ve dielektrik katman boyunca plazmonlara bağlanması sonucunda Yüzey Plazmon Rezonans (SPR)'ı olarak adlandırılan fenomen oluşur (Jana ve diğ., 2016). Metal dielektrik yüzey boyunca yayılan yüzey plazmonları yüzeyin kırılma indisi değişikliklerine oldukça duyarlı bir haldedir (Rahad ve diğ., 2023). Bu sayede SPR tabanlı sensörler yüzeydeki en küçük kırılma indisi değişikliklerini bile tespit edebilecek hassasiyete sahip hale gelir.

SPR' ın yanı sıra güçlü yöntemlerden biri de Lokalize Yüzey Plazmon Rezonansı (LSPR) tabanlı sensörlerdir (Bhalla ve Shen, 2024). Bu sensörler yüzeylerinde dalga boyu altı metal parçacıklar bulundurur. Bu parçacıkların boyutu gelen ışığın boyutundan küçüktür ve çoğunlukla meta-atom ya da



nanoparçacık olarak adlandırılırlar. Bu dalgaboyu altı parçacıklar yüzey plazmonlarını yerleştirirler ve aydınlatılmış alanlara sıkıştırarak güçlü tepkisel modlar oluştururlar. Bu sayede LSPR tabanlı plazmonik sensörler güçlü elektrik ve manyetik alanlar meydana getirerek sensör yüzeyini kırılma indisi değişikliklerine daha hassas hale getirebilir. Bu avantajının yanı sıra güçlü sınırlama özelliğinden dolayı yaklaşık 5-60 nm'lik kısa bozunma uzunluklarına sahiptirler. SPR' da bu 100-600 nm bozunma uzunluğu olarak görülebilir ki daha büyük biyomoleküllerin tespiti için SPR' ı daha yetenekli kılar. Ancak buna rağmen çok daha küçük biyomoleküllerin algılanmasında LSPR tabanlı plazmonik sensörler güçlü bir aday olarak gösterilir (Duan ve diğ., 2021).

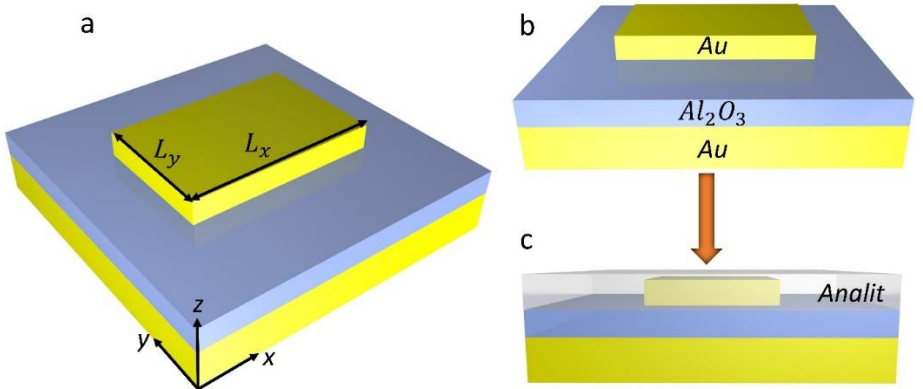
Metamalzeme tabanlı plazmonik sensörlerin rezonatörlerinin geometrik şekillerine bağlı olarak farklı dalgaboylarına uygun rezonans modları elde edilebilir. Bu yetenekleri onları Yüzey Geliştirilmiş Kızılötesi Emilimi (SEIRA) yöntemi için de iyi bir aday yapar (Bibikova ve diğ., 2017). SEIRA yöntemi ilk olarak 1980 yılında Hartstein tarafından tanıtıldı ve elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde moleküler tek tabakaların titreşim bantlarının algılanabilirliğini gösterilmiş oldu (Janneh, 2022). Buna göre moleküllerin kızılötesi bölgede sahip oldukları spektral parmak izleri, anten rezonansının o bölgeye ayarlanabilir olması sonucunda biyomoleküler tespitini gerçekleştirilebileceği düşünülebilir. Dolayısıyla spektral olarak farklı dalgaboylarına rezonans modlarının ayarlanabilmesi bu yöntemin kullanımı için oldukça önemlidir.

Bu çalışmada dikdörtgen nanoparçacıklı bir plazmonik sensör yapısı önerilmiştir. Bu sensör yapısı orta kızılötesi bölgenin farklı frekans bantlarında neredeyse bire yakın soğurum oranı elde eder. Bu sayede yüzeye gelen elektromanyetik dalga dikdörtgen nanoparçacıklar ve dielektrik katman boyunca yakalanarak güçlü rezonans modu elde eder. Bu rezonans modu yüzeydeki kırılma indisi değişikliklerine tepki olarak spektral aralıkta kayar. Bu sayede sensörün yüzeyde meydana gelecek biyomoleküler değişiklikleri algılaması amaçlanır. Bu yöntem plazmonik sensör üzerinde başarılı bir şekilde uygulanmış ve elde edilen bulgular sensörün hassas bir tepkiyle biyomoleküler tespiti gerçekleştirdiği gösterilmiştir. Buna ek olarak sensörün orta-kızılötesi bölgede rezonans modunun ayarlanabilir olması SEIRA gibi spektral parmak izlerini tespit eden yöntemler için kullanılabilir.

## 2.YÖNTEM

Şekil 1a metamalzeme tabanlı plazmonik sensörün bir modelini göstermektedir. Plazmonik sensörün en altında 200 nm kalınlığında bir altın katman bulunur. Bu altın katman yüzeyden gelen elektromanyetik dalganın dielektrik katmanı geçerek sızmasını engeller ve optik ayna işlevi görür. Bu sayede gelen elektromanyetik dalga ayna yükleri gibi davranır ve dielektrik metal katman arasında hareket eder. 200 nm kalınlık bu sızıntıyı engelleyecek değere optimize edilmiştir. Orta katmanda 100 nm kalınlığında  $Al_2O_3$  dielektrik malzemesi bulunur. Bu malzeme iki metal katman arasında elektromanyetik dalganın yayılımını ve soğurulmasını sağlar. En üst katmanda 60 nm kalınlığında bir altın dikdörtgen rezonatör bulunmaktadır. Bu dikdörtgen rezonatörün eni ve boyu  $L_x$  ve  $L_y$  parametreleri ile gösterilmiştir. Plazmonik biyosensörün tek hücresi x, y ve z eksenlerinde uzanır. Burada tek hücrenin x ve y eksenini boyunca periyodu 2000 nm'dir. Şekil 1b ve Şekil 1c plazmonik yapının yanal eksen görüntülerini göstermektedir. Çalışma boyunca yapılan simülasyonlarda yüzey çıplak ve analit ile kaplanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Buna göre sensörün çıplak halinin görünümü Şekil 1b'de, analit ile kaplanmış hali ise Şekil 1c'de gösterilmiştir.

Plazmonik sensörün nümerik hesaplamaları ve modellemesi Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar Lumerical FDTD yazılımı kullanılarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar bu programla analiz edilmiştir. Plazmonik yapının tek bir hücresi simüle edilirken x ve y eksenini boyunca periyodik sınır koşulları kullanılmıştır. Bunun yanı sıra z eksenini boyunca Mükemmel Eşleşen Katmanlar (PML) sınır koşulu kullanılmıştır. Tüm malzemelerin kırılma indisleri yazılımın veri tabanı üzerinde tanımlı Palik datalarından alınmıştır (Palik, 1991).

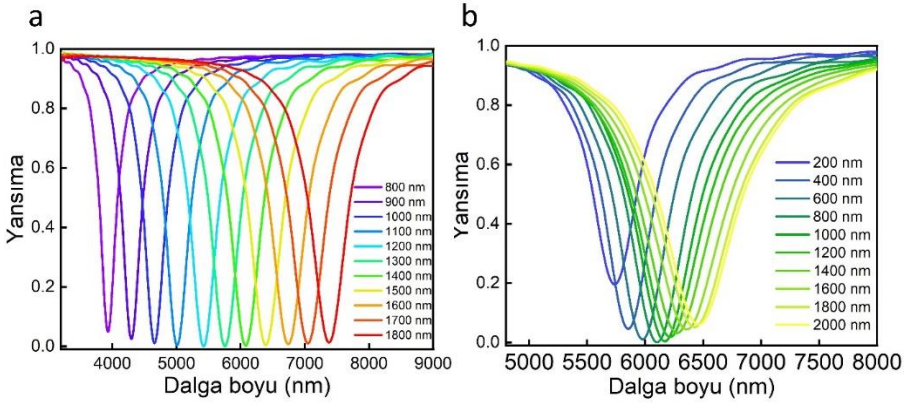


Şekil 1. a) Plazmonik sensörün modeli, b) Çıplak halinin yanal görüntüsü, c) Analit kaplanmış halinin yanal görüntüsü

Plazmonik sensörün simülasyon sonuçları Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2a ve Şekil 2b, sırasıyla Lx ve Ly parametrelerinin farklı değerlerine bağlı olarak rezonans modunda meydana gelen spektral değişimleri gösterir. Buna göre Şekil 2a’ da Ly parametresi 1200 nm olarak sabit tutulmuş ve Lx parametresi 800 nm ile 1800 nm aralığında değiştirilmiştir. Bu değişim baz alındığında sensörün rezonans modunun yaklaşık 4000 nm dalga boyundan yaklaşık 7500 nm dalga boyuna kaydığı görülmektedir. Bu kayma farklı rezonatörler ile orta-kızılötesi bölgede güçlü rezonans modları elde edilebileceğini gösterir. Bu dinamik ayarlanabilirlik sayesinde SEIRA yöntemi baz alınarak spesifik moleküllerin spektral parmak izleri rezonans modlarına ayarlanabilir ve titreşim bantları tespit edilebilir hale gelir. Buna ek olarak Lx parametresinin 1400 nm olduğu durumda yaklaşık 6100 nm dalga boyunda %99 oranında bir soğurum oranıyla neredeyse bire yakın bir emilimin gerçekleştiği görülmektedir. Bunun anlamı yüzeye gelen elektromanyetik dalganın Lx ve Ly parametrelerine bağlı olarak yüzey plazmonlarına güçlü bir şekilde bağlanarak sifıra yakın bir yansıma ve iletim oranının elde edilebileceği gösterilir. Bu eşitlik denklem 1’ de gösterilmiştir (Landy ve diğ., 2008).

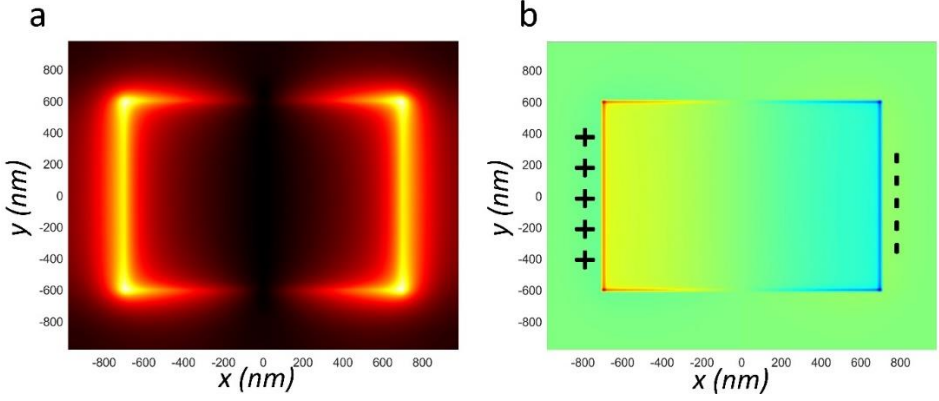
$$A(\omega) + R(\omega) + T(\omega) = 1 \quad (1)$$

Buna göre  $A(\omega)$  soğurum,  $R(\omega)$  yansıma ve  $T(\omega)$  iletim oranlarını temsil eder. Yansımanın sıfır olduğu Şekil 2a’ da görülmektedir. En alt katmanda bulunan optik ayna da iletimi engelleyerek sıfır olmasını sağlar. Dolayısıyla denklem 1’ e göre soğurum oranının 1 olduğu görülmüştür. Şekil 2b Lx parametresinin 1400 nm’ ye sabitlendiği ve Ly parametresinin 200 ile 2000 nm arasında değiştirildiği durumu gösterir. Buna göre Lx’ in değiştirildiği durumun aksine soğurum oranlarında ciddi değişikliklerin olduğu görülmektedir. Bu, yüzey plazmonlarının x eksenini boyunca yayılımına bağlı olarak y ekseninin meydana gelen parametrik değişikliklerin daha güçlü değişiklikler verdiğini gösterir. Buna göre artan Ly parametresine bağlı olarak rezonans modunun daha büyük dalgaboylarına kaydığı görülürken yansıma oranının da giderek küçüldüğü tespit edilmiştir. Yansımanın minimum olduğu 6100 nm dalgaboyundan sonra artan Ly parametre büyüklüğü yeniden yansıma oranında bir düşüşe neden olsa da daha küçük boyutlara göre azalma oranı düşmüştür.



**Şekil 2. a)** Lx parametresinin 800 nm ile 1800 nm arasındaki değişimine bağlı olarak rezonans modundaki değişim, **b)** Ly parametresinin 200 nm ile 2000 nm arasındaki değişimine bağlı olarak rezonans modundaki değişim.

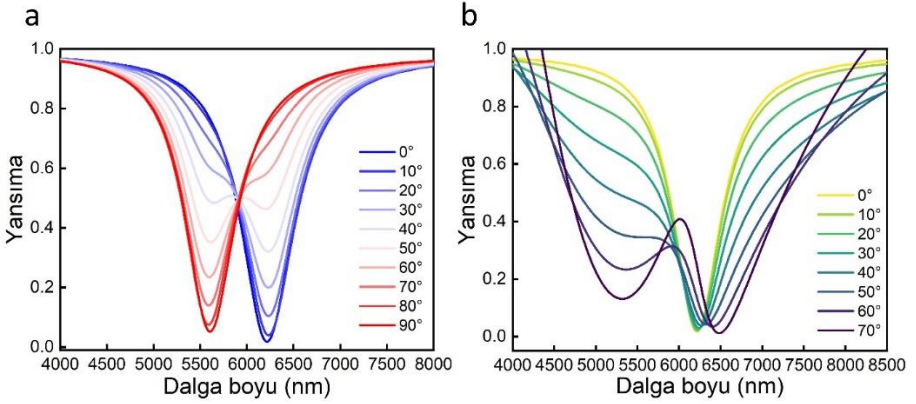
Şekil 3 plazmonik yapının elektrik alan ve yük dağılım grafiklerini göstermektedir. Gelen elektromanyetik dalganın neden olduğu yüzey plazmon hareketine bağlı olarak yüzeyde gelişen elektrik alan ve yük dağılımının temelinde, metal-dielektrik ara yüzeyinde rezonans koşullarında oluşan kolektif elektron salınımları yatmaktadır. Bu salınımlar, yüzeyde lokalize elektrik alanlarının oluşmasına ve yüklerin belirli bölgelerde birikmesine yol açarak yüzey plazmonlarının karakteristik alan dağılımını ortaya çıkarır. Şekil 3a orta-kızılötesi bölgede yaklaşık 6100 nm dalgaboyunda meydana gelen rezonansın yakın elektrik alan dağılımını gösterir. Dikdörtgen şekilli nanoantenin elektromanyetik sınırlaması aynı zamanda sıcak nokta olarak da adlandırılır ve rezonatörün etrafına doğru sınırlı bir bölge oluşturur. Bu sınırlı bölge LSPR fenomeninin bir sonucudur ve rezonatörün her iki yanında güçlü bir şekilde yoğunlaşmaya neden olur. Şekil 3b’ de dikdörtgen nanoantenin asimetric yapısına bağlı olarak rezonans modundaki (6100 nm) yük dağılımı gösterilmiştir. Yüze gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni yüzdeki serbest elektronları harekete geçirerek yüzey boyunca hareket ettirir ve rezonans modunda dipolar bir kutuplanmaya neden olur. Dipol formundaki bu kutuplaşma Şekil 3b’ de + ve – yüklerle açık bir şekilde gösterilmiştir. Bunun anlamı dikdörtgen nanoparçacık boyunca pozitif ve negatif yüklerin oluşturduğu zıt polarize durumun gerçekleştiğidir. Tıpkı yakın elektrik alanda olduğu gibi dikdörtgenin uçlarına doğru yoğunlaşır ve lokalize bir dağılım gösterir. Bu salınımaya bağlıdır ve nanoparçacığın şekli bu salınımın yönünü belirleyebilir. Bu dipolar yük dağılımı elektromanyetik alanın güçlü bir şekilde lokalize olduğunu gösterir ve plazmonik sensörün sinyalinin güçlenmesine ve algılama hassasiyetinin artmasına neden olur.



**Şekil 3. a)** Plazmonik yapının dikdörtgen rezonatör boyunca görülen elektrik alan dağılımı, **b)** Plazmonik yapının dikdörtgen rezonatör boyunca görülen yük dağılımı

Şekil 4a, 1400 nm  $L_x$  parametresi ve 1200 nm  $L_y$  parametresinin seçildiği durumda dikdörtgen nanoparçacığın rotasyonel dönüşüne bağlı olarak rezonans modundaki değişimi gösterir. Bu analizde dikdörtgen nanoparçacık boyutları sabit tutularak saat yönünün tersinde rotasyonel olarak 0 ile 90 derece arasında döndürülmüştür. Küçük açılı dönüşler mavi ağırlıklı renklerle ve büyük açılı dönüşler kırmızı ağırlıklı renklerle gösterilmiştir. Buna göre küçük rotasyonel dönüşler sensörün rezonans modunda büyük bir sapmaya neden olmazken yansıma oranını ciddi şekilde artırmıştır. Bu da dikdörtgen rezonatörün asimetrik yapısına bağlı olarak polarizasyondan bağımsız çalışmadığını gösterir. Ancak yansıma oranındaki bu artışa rağmen hala rezonans modunun korunduğu ve kayan parametre büyüklüğüne bağlı olarak sola şekillenen bir rezonans modunda yüksek soğurumun tekrar elde edildiği görülmektedir.

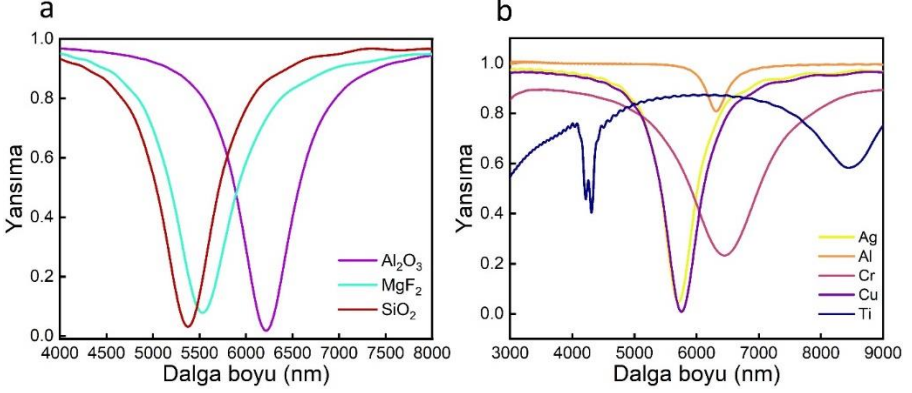
Şekil 4b plazmonik tabanlı yapının x polarize ışık altında, ışığın geliş açısına bağlı olarak rezonans modundaki değişiklikleri gösterir. Buna göre artan geliş açısına bağlı olarak rezonans modunda ve sinyalinde değişime neden olduğu açıkça görülür. Ancak 70 derece gibi büyük bir geliş açısında bile sensörün yaklaşık 6500 nm dalga boyunda düşük yansıma oranıyla bir dip açığa çıkardı görülmektedir. Özellikle biyoalgılama temelli sensör yapıları daha çok algılamanın dar bantlı, sürekli ve kararlı bir rezonans sinyaliyle yapılmasına yönelik geliştirilir. Çünkü bu sayede güçlü rezonans modundaki spektral kaymalar görünür hale gelebilir. Ancak buna rağmen sensörün farklı uygulamalar için hala yüksek bir soğuruma sahip ve rezonans modunda büyük bir değişikliğe uğramayan yansıma sinyalini koruduğu söylenebilir.



**Şekil 4. a)** Dikdörtgen nanoantenin rotasyonel dönüşüne bağlı olarak rezonans modundaki değişim, **b)** x polarize ışığın geliş açısına bağlı olarak değişen rezonans sinyali.

Şekil 5' de plazmonik tabanlı yapı için farklı malzemelerin rezonans moduna etkisi incelenmiştir. Öncelikle rezonatör ve optik ayna altın olarak seçilmiş ve  $Al_2O_3$ ,  $MgF_2$  ve  $SiO_2$  dielektrik malzemeleri kullanılarak yansıtma cevabı incelenmiştir. Buna göre her üç dielektrik malzeme için de güçlü rezonans modları elde edilmiştir. Ancak burada  $MgF_2$ ' nin nispeten daha düşük yansıtma oranına sahip bir rezonans modu davranışı gösterdiği görülmektedir.  $SiO_2$ , plazmonik yapıli sensör sistemlerinde aralayıcı malzeme olarak en sık kullanılan malzemedir. Ucuzdur ve kaplama yöntemleri diğerlerine nispeten daha karardır. Buna göre elde edilen spektral cevap her ne kadar  $Al_2O_3$  den daha yüksek bir yansıtma oranına sahip olsa da bu iki sonuç oldukça yakındır. Ancak  $Al_2O_3$  ile elde edilen yansıtma sinyalinin daha kararlı bir sinyal davranışı sergilediğine dikkat edilmelidir. Silikada ise özellikle 6500 nm dolaylarında sinyal gürültüleri mevcuttur. Bu durum SEIRA temelli bir ölçüm esnasında ek osilatif hareketlere neden olarak ölçüm sonuçlarını kararsız hale getirebilir. Şekil 5b' de farklı metal rezonatörlerin kullanılması sonucunda elde edilen yansıtma sinyal cevapları gösterilmiştir. Buna göre  $Al_2O_3$  dielektrik malzemesi kullanılarak sırasıyla gümüş, alüminyum, krom, bakır ve titanyum malzemeleri rezonatör olarak tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre gümüş ve bakır diğer malzemelere göre daha güçlü rezonans modları elde etmiştir. Bu materyallerin her biri altından daha az maliyetlidir. Ancak altının kullanımının sağladığı iki önemli avantaj vardır. Bunlardan birincisi altının yüksek elektriksel iletkenliği ve kararlı yapısı sayesinde atomlar arası bağlanma enerjileri büyüktür. Bundan dolayı oldukça sağlam ve kırılabilirliği azdır. Nanoboyutlarda bile istenilen şekillere esnek bir şekilde fabrike edilebilirler ve deformasyona neden olmazlar. İkinci avantajları

biyosensörler için oksidasyona uğramamalarıdır. Gümüş ve bakır gibi metaller sıvı analitlerle temas ettikten sonra kolay bir şekilde oksidasyona uğrayabilirler ve algılama performansları ciddi şekilde azalır. Buna ek olarak plazmonik sensörlerin en önemli avantajlarından biri tekrarlanabilirlikleridir ve oksidasyon sonucu kaybedilen hassasiyet bu avantajın önünde engel teşkil eder. Bundan dolayı ölçüm modelinde altın kullanılmıştır.



**Şekil 5. a)** Farklı dielektrik malzemelerin rezonans moduna etkileri, **b)** Farklı metal rezonatörlerin rezonans moduna etkileri.

### 3.BULGULAR

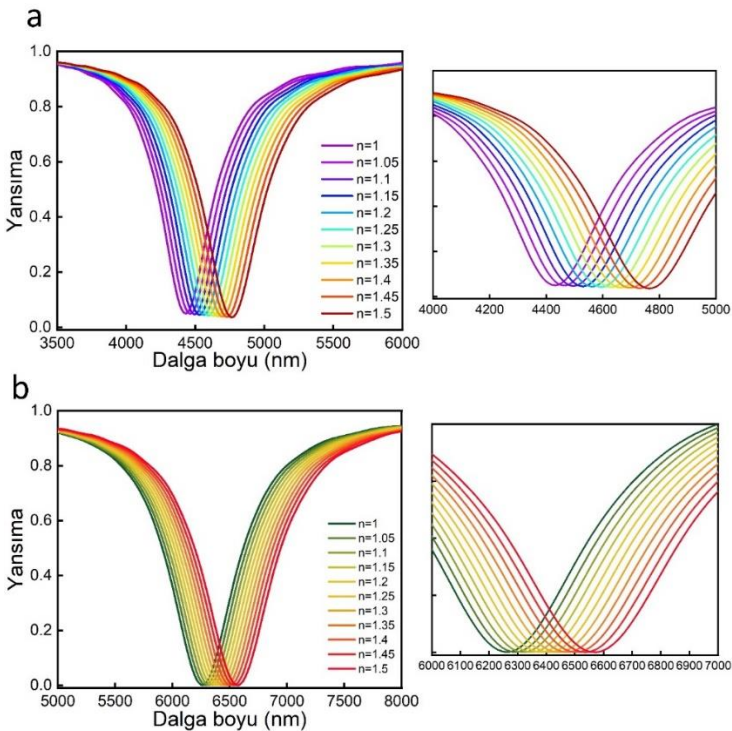
Bu bölümde önerilen plazmonik tabanlı sensör yapısının değişen ortam kırılma indisine bağlı olarak tespit yeteneği araştırılmıştır. Sensörün kırılma indisi tespitinde kullanılan temel parametrelerden biri sensörün hassasiyeti (S)' dir. Sensör hassasiyeti anten yapısının neden olduğu rezonans modunda meydana gelen değişime direkt olarak bağlıdır. Buna göre kırılma indisindeki değişimin dalga boyunda meydana getirdiği kayma miktarı sensörün hassasiyetini belirler. Optik sensörlerin kırılma indisi hassasiyeti genellikle denklem 2 ile ifade edilir (Yu ve diğ., 2021):

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (2)$$

Burada S hassasiyeti,  $\Delta\lambda$  rezonans dalga boyunda meydana gelen değişimi ve  $\Delta n$  sensör yüzeyindeki kırılma indisi değişimini ifade eder. Şekil 6 farklı rezonans modlarına sahip iki sensör yapısının değişen ortama kırılma indisi değerlerine göre spektral cevaplarını gösterir. Burada Lx parametresi 900 nm ve 1500 nm değerleriyle seçilerek simüle edilmiştir. Bu değerlerin seçilme nedeni Lx parametresinin büyümesine bağlı olarak büyük dalgaboylarına spektral kaymanın yanı sıra sinyalin daha geniş bant davranışı sergilemesidir. Daha düşük Lx parametrelerinde daha

düşük soğurum oranı görülürken nispeten daha dar bir bantta rezonans sinyali davranışı gözlenmiştir. Şekil 6a' da  $L_x$  parametresi nispeten daha dar bir bantta soğurum davranışı gösterdiği 900 nm boyutuna ayarlanmış ve ortam kırılma indisi 1 ile 1.5 değerleri arasında 0.5 adımlarla değiştirilmiştir. Bu değişime bağlı olarak rezonans sinyali 382 nm sağa kaymıştır. Denklem 2 kullanılarak sensörün hassasiyeti hesaplandığında 760 nm/RIU olarak belirlenmiştir.

Şekil 6b' de  $L_x$  parametresinin nispeten daha geniş bir bantta soğurum davranışı gösterdiği 1500 nm boyutuna ayarlanmış ve ortam kırılma indisi yine 1 ile 1.5 değerleri arasında 0.5 adımlarla değiştirilmiştir. Bu değişime bağlı olarak rezonans sinyali yaklaşık olarak 327 nm sağa kaymıştır. Yine denklem 2 kullanılarak sensörün hassasiyeti hesaplandığında bu kez hassasiyetin 654 nm/RIU olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre plazmonik sensörün parametrelerine bağlı olarak nispeten daha dar bantlı bir hassasiyet gösteren rezonans modunun daha hassas ölçüm sonucu verdiği görülmüştür. Ancak bu değişim göz önüne alındığında sensörün her iki rezonans modunda da yaklaşık değerli bir hassasiyete sahip olduğu söylenebilir.



**Şekil 6.**  $L_x$  parametresinin farklı değerleri için değişen kırılma indislerine bağlı olarak gözlenen spektral kaymalar **a)**  $L_x=900$  nm ve **b)**  $L_x=1500$  nm.



#### 4.SONUÇ

Plazmonik biyosensörler hassas, etiketsiz, gerçek zamanlı ve nispeten düşük maliyetli ölçüm yetenekleri sayesinde son yıllarda popüler hale gelmiştir. SPR ve SEIRA gibi yöntemler plazmonik biyosensörlerin farklı biyomolekülleri başarılı bir şekilde algılayabilme yeteneğini ortaya koymuştur. Buna ek olarak LSPR fenomenine dayalı biyosensörler ek bir kırılma prizması ihtiyacı duymadan dalga boyu altı büyüklükteki nanoparçacıklar sayesinde güçlü ve sınırlı elektrik alanlar oluşturarak sensör yüzeyini dış etkilere karşı oldukça duyarlı hale getirmiştir. Bu çalışmada da dikdörtgen nanoparçacıklardan oluşan bir plazmonik sensör yapısı önerilmiştir. Bu dikdörtgen rezonatörlerin  $L_x$  ve  $L_y$  parametreleri değiştirilerek spektral cevabın elektromanyetik spektrumun orta-kızılötesi bölgesinde kaydırıldığı ve geniş bir alanda ayarlanabildiği kanıtlanmıştır. Elektrik alan ve yük dağılımı grafikleriyle rezonans modunda meydana gelen sınırlı elektrik alan dipol yük dağılımının oluşumu detaylı olarak açıklanmıştır. Kırılma indisi değişimini algılamak için sensör rezonans modlarından ikisi parametrelerle ayarlanarak ortam kırılma indisine bağlı olarak spektral cevapları incelenmiştir. Buna göre elde edilen bulgular sensörün 760 nm/RIU değerinde bir hassasiyete sahip olduğunu göstermiştir.

## KAYNAKLAR

- Bhalla, N., Jolly, P., Formisano, N., Estrela, P., 2016, Introduction to Biosensors, Essays in Biochemistry, 60(1), 1-8, <https://doi.org/10.1042/EBC20150001>.
- Bhalla, N., Shen, A. Q., 2024, Localized Surface Plasmon Resonance Sensing and its Interplay with Fluidics, *Langmuir*, 40(19), 9842-9854, <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c00374>.
- Bibikova, O., Haas, J., López-Lorente, A. I., Popov, A., Kinnunen, M., Meglinski, I., Mizaikoff, B., 2017, Towards enhanced optical sensor performance: SEIRA and SERS with plasmonic nanostars, *Analyst*, 142(6), 951–958, <https://doi.org/10.1039/C6AN02596J>.
- Carrero-Ferrer, I., Molins-Legua, C., Campíns-Falcó, P., 2022, Plasmonic sensor for hydrogen sulphide in saliva: Multisensor platform and bag format, *Talanta*, 245, 123449, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123449>.
- Duan, Q., Liu, Y., Chang, S., Chen, H., Chen, J.-h., 2021, Surface Plasmonic Sensors: Sensing Mechanism and Recent Applications, *Sensors*, 21(16), 5262, <https://doi.org/10.3390/s21165262>.
- Elsayed, H.A., Awasthi, S.K., Almawgani, A.H.M., Mehaney, A., Ali, Y.A.A., Alzahrani, A., Ahmed, A.M., 2024, High-performance biosensors based on angular plasmonic of a multilayer design: new materials for enhancing sensitivity of one-dimensional designs, *RSC Advances*, 14(11), 7877-7890, DOI: 10.1039/D3RA08731J.
- Haky, A., Vasanelli, A., Pantzas, K., Todorov, Y., Beaudoin, G., Patriarche, G., Sagnes, I., Sirtori, C., 2024, Engineering the plasmon modes of a confined electron gas, *Nanophotonics*, 13(10), 1851-1857, <https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0795>.
- Hill, R.T., 2014, Plasmonic Biosensors, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 7(2), 152-168, <https://doi.org/10.1002/wnan.1314>.
- Jana, J., Ganguly, M., Pal, T., 2016, Enlightening surface plasmon resonance effect of metal nanoparticles for practical spectroscopic application, *RSC Advances*, 6, 86174-86211, <https://doi.org/10.1039/C6RA14173K>.
- Janneh, M., 2022, Surface enhanced infrared absorption spectroscopy using plasmonic nanostructures: Alternative ultrasensitive on-chip biosensor technique, *Results in Optics*, 6, 100201, <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100201>.
- Kim, D.M., Park, J.S., Jung, S.-W., Yeom, J., Yoo, S.M., 2021, Biosensing Applications Using Nanostructure-Based Localized Surface Plasmon Resonance Sensors, *Sensors*, 21(9), 3191, <https://doi.org/10.3390/s21093191>.

- Kulshreshtha, N.M., Shrivastava, D., Bisen, P.S., 2017, Contaminant sensors: nanotechnology-based contaminant sensors, *Nanobiosensors*, Pages 573-628, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804301-1.00014-X>.
- Landy, N.I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., Smith, D.R., Padilla, W.J., 2008, Perfect Metamaterial Absorber, *Physical Review Letters*, 100(20), 207402, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>.
- Lino, C., Barrias, S., Chaves, R., Adegá, F., Martins-Lopes, P., Fernandes, J.R., 2022, Biosensors as Diagnostic Tools in Clinical Applications, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Cancer*, 1877(3), 188726, <https://doi.org/10.1016/j.bbcan.2022.188726>.
- Liu, H., Fu, Y., Yang, R., Guo, J., Guo, J., 2023, Surface plasmonic biosensors: principles, designs and applications, *Analyst*, 148(24), 6146-6160, <https://doi.org/10.1039/D3AN01241G>.
- Naresh, V., Lee, N., 2021, A Review on Biosensors and Recent Development of Nanostructured Materials-Enabled Biosensors, *Sensors*, 21(4), 1109, <https://doi.org/10.3390/s21041109>.
- Nguyen, D.D., Lee, S., Kim, I., 2023, Recent Advances in Metaphotonic Biosensors, *Biosensors*, 13(6), 631, <https://doi.org/10.3390/bios13060631>.
- Palik, E.D., ed., 1991, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-544422-4.50002-9>.
- Rahad, R., Rakib, A.K.M., Haque, M.A., 2023, Plasmonic refractive index sensing in the early diagnosis of diabetes, anemia, and cancer: An exploration of biological biomarkers, *Results in Physics*, 49, 106478, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106478>.
- Riedel, T., Hageneder, S., Surman, F., Pop-Georgievski, O., Noehammer, C., Hofner, M., Brynda, E., Rodriguez-Emmenegger, C., Dostálek, J., 2017, Plasmonic Hepatitis B Biosensor for the Analysis of Clinical Saliva, *Analytical Chemistry*, 89(5), 2972–2977, <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b04432>.
- Senf, B., Yeo, W.-H., Kim, J.-H., 2020, Recent Advances in Portable Biosensors for Biomarker Detection in Body Fluids, *Biosensors*, 10(9), 127, <https://doi.org/10.3390/bios10090127>.
- Soler, M., Lechuga, L.M., 2021, Principles, Technologies, and Applications of Plasmonic Biosensors, *Journal of Applied Physics*, 129(11), 111102, <https://doi.org/10.1063/5.0042811>.
- Song, Z., Zhou, S., Qin, Y., Xia, X., Sun, Y., Han, G., Shu, T., Hu, L., Zhang, Q., 2023, Flexible and Wearable Biosensors for Monitoring Health Conditions, *Biosensors*, 13(6), 630, <https://doi.org/10.3390/bios13060630>.

- Waele, R., Burgos, S.P., Atwater, H.A., Polman, A., 2010, Negative refractive index in coaxial plasmon waveguides, *Optics Express*, 18(12), 12770-12778, <https://doi.org/10.1364/OE.18.012770>.
- Xiao, Y., Zhang, Z., Yin, S., Ma, X., 2023, Nanoplasmonic Biosensors for Precision Medicine, *Frontiers in Chemistry*, 11, 1209744, <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1209744>.
- Xu, H., Xiang, Y., Dai, X., Wu, L., Guo, J., 2016, Ultrasensitive biosensors based on long-range surface plasmon polariton and dielectric waveguide modes, *Photonics Research*, 4(6), 262-266, <https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000262>.
- Yu, J., Zhu, J., Ye, S., Wang, X., 2021, Ultra-wide sensing range plasmonic refractive index sensor based on a two-dimensional circular-hole grating engraved on a gold film, *Results in Physics*, 26, 104396, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104396>.

## **2. Bölüm**

### **Konik Kırıclarda Yapısal Tasarım Hususları ve Optimum Koşullar**

**Ali Kemal ÇAKIR<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Doç. Dr., Adnan Menderes Üniversitesi Germencik Yamantürk Meslek Yüksek Okulu  
ORCID: 0000-0002-2185-8108

## 1. Giriş

Yerüstünde veya yeraltında bulunan değerli mineraller çeşitli maden işletme metotlarıyla üretilerek yan kayaçlar (değersiz) ile tüvanan (doğal su kaynaklarından çıkarılmış ve yıkanmamış olduğu gibi kullanılan kum çakıl karışımı malzemesi) malzeme olarak elde edilmektedirler. Kullanılacak yere veya uygulanacak cevher zenginleştirme metoduna bağlı olarak tüvanan cevherin tane boyutunun küçültülmesi gerekir. Bu amaca dayanarak yapılan boyut küçültme işlemlerine ufalama denilmektedir. Ayrıca, ufalama, öğütme ve kırma işlemlerinin hepsine verilen genel bir tanımdır [1]. Ufalama işlemindeki amaç:

- ✓ Cevher içerisindeki mineralleri serbest duruma getirmek
- ✓ Cevher hazırlama metotlarına uygun boyutta malzeme elde etmek
- ✓ Cevher malzemelerinin yüzey alanını arttırmak
- ✓ Tüketim amaçlı kullanılacak ise belirli boyutta uygun malzeme hazırlamak (kum, çakıl v.b.) (2).

Maden sanayi sektöründe iki çeşit kırma prensibi vardır. Bunlar, sıkıştırma ile kırma ve darbe ile kırma metotlarıdır. Kaya malzemelerinin içeriği çoğunlukla kristaldir. Kristalli yapıdaki atomlar düzenli üç boyutlu yapıda sıralanır (3). Kaya malzemelerinde yüzey azaltma işlemlerinde kullanılan ekipmanlardan konik kırıcılar sektöre önemli bir yere sahiptir.

Konik kırıcı kırma işlemini makinanın iki konik yüzeyi arasında yaptığından konik kırıcı denilmektedir. Diğer bir deyişle, konik kırıcı kayaları eksantrik olarak dönen bir koni (manto olarak da adlandırılır) ve bir içbükey arasında sıkıştırarak kıran bir cihazdır (4). Bu konik yüzeylerden biri sabit diğeri eksantrik döner bir yatağa bağlıdır. Kırılacak malzemeler aşağı doğru akarken eksantrik olarak dönen yüzey, parçaları sabit yüzeye sıkıştırarak kırma işlemini gerçekleştirir.

Manto ve içbükey, kademeli olarak aşınıp şekil değiştiren aşınmaya dayanıklı astarlara sahiptir. Parçacıklar konik kırıcıya yukarıdan girer, ardından manto ile içbükey arasında sıkışıp kaldıkları ve uygulanan büyük sıkıştırma kuvvetleri tarafından birçok kez kırılma potansiyeline sahip oldukları çalışma yüzeylerine yakın olana kadar aşağı doğru hareket eder. Daha büyük kayalar önce kırıcının alt konumlarına düşerek kırılır ve burada tipik olarak kırıcının altından çıkacak kadar küçük olana kadar tekrar kırılırlar. Bir konik kırıcının çıkışı, herhangi bir yükseklikte manto ve içbükeyin minimum yaklaşımı olan Kapalı Kenar Ayarı (CSS) tarafından kontrol edilir. Bu, belirli bir boyuttaki bir parçacığa uygulanabilecek en yüksek gerilimi ve dolayısıyla parçalanıp kırılmayacağını ve hangi parçalara bölüneceğini belirler. CSS'nin karşı tarafındaki Açık Taraf Ayarı (OSS), manto ve içbükeyin maksimum daraltılmış ayarımıdır ve boşluk açılıp

parçacıklar hareket edip aşağı doğru hareket ettikçe malzemenin dikey akışını esasen kontrol eder (4-7).

Konik kırıcılar madencilik ve taş kırma endüstrilerinde çok önemlidir ve çeşitli malzemelerin kırılmasında ve işlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Verimli performansları büyük ölçüde sağlam yapısal tasarımlarına bağlıdır. Konik kırıcılar, kırma işlemi sırasında malzemeyi kırma boşluğuna doğru iterek ve sıkıştırarak kırma işlemi gerçekleştirirler. İlk olarak, malzeme koni şeklindeki kırıcıya beslenir ve kırma odası içinde dönen çekiçlerle kırılır. Çekiçlerin dönüş hızı ve kırma odasındaki basınç ayarlanarak malzeme kırılır ve küçük parçalara ayrılır.

Bu makale, konik kırıcıların yapısal inceliklerini ele almakta, temel bileşenlerinin, tasarım hususlarının ve yapısal bütünlüğün performans ve bakım üzerindeki etkilerinin derinlemesine bir analizini sunmaktadır. Bir koni kırıcı, sıkıştırma kuvvetleri ve kesme kuvvetlerinin bir kombinasyonu yoluyla büyük kayaları daha küçük, yönetilebilir parçalara ayırmak için tasarlanmıştır. Koni kırıcının birincil bileşenleri şunlardır:

1. Çerçeve: Koni kırıcının temeli olan çerçeve, kırma işlemi desteklemek için gerekli sertliği sağlar. Çeşitli bileşenleri barındırır ve genellikle çalışma sırasında oluşan muazzam kuvvetlere dayanacak şekilde ağır hizmet tipi çelikten yapılır.

2. Konik Kafa (veya Manto): Manto olarak da bilinen koni kafa, kırıcının malzemeye baskı uygulayan parçasıdır. Ömrünü uzatmak ve etkili kırmayı sürdürmek için aşınmaya dayanıklı malzeme ile kaplanmıştır.

3. İçbükey (veya Kase Astarı): İçbükey, koni kafasını çevreleyen sabit kısımdır. Malzemeyi sıkıştırma kuvvetleriyle ezmek için manto ile etkileşime girecek şekilde tasarlanmıştır.

4. Ana Şaft: Ana şaft, koni başlığını tahrik mekanizmasına bağlar ve koni başlığının dönüşünde ve hareketinde aksenal bir rol oynar. Önemli gerilimlere maruz kalır ve dayanıklılık için hassas bir şekilde tasarlanmalıdır.

5. Eksantrik Tertibat: Eksantrik tertibat, koni başlığının salınımını kontrol eder. Mantoyu dönerek hareket ettirdiği için kırma işlemi için çok önemlidir.

6. Hidrolik Sistem: Modern koni kırıcılar genellikle kırıcı ayarlarını ayarlamak, aşınma ve yıpranmayı yönetmek ve daha kolay bakım sağlamak için hidrolik sistemler içerir.

7. Tahrik Mekanizması: Tahrik mekanizması genellikle eksantrik tertibatını ve konik başın dönüşünü sağlayan bir motor ve dişli sistemini içerir.

## 2. Yapısal Analiz

Bir konik kırıcı için detaylı bir yapısal analiz, her bir bileşene etki eden gerilimleri ve kuvvetleri incelemeyi ve bu kuvvetlerin kırıcının genel performansını ve güvenilirliğini nasıl etkilediğini anlamayı içerir. Bu analizde gerilim dağılımı, malzeme seçimi, kırıcı ekipman etkileşimi, hidrolik sistem, malzeme aşınma ve yıpranma durumları önem arz etmektedir.

1. Gerilim Dağılımı: Şasi ve ana şaft, çalışma sırasında yüksek gerilim seviyelerine dayanmalıdır. Sonlu eleman analizi (FEA), gerilim dağılımını simüle etmek ve olası arıza noktalarını belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Eşit gerilim dağılımının sağlanması, yapısal arıza riskini en aza indirmeye yardımcı olur ve kırıcının ömrünü uzatır.

2. Malzeme Seçimi: Konik kafa, konkav ve diğer kritik bileşenler için malzeme seçimi çok önemlidir. Yüksek kaliteli alaşımlı çelikler ve aşınmaya dayanıklı malzemeler, mukavemetlerine, tokluklarına ve aşınmaya karşı dirençlerine göre seçilir. Uygun malzeme seçimi, zorlu çalışma koşulları altında yapısal bütünlüğün korunmasına yardımcı olur.

3. Bileşen Etkileşimi: Konik kafa ile konkav arasındaki etkileşim, kırıcının verimliliğinde önemli bir faktördür. Temas kuvvetlerinin ve aşınma modellerinin analiz edilmesi, performansı artırmak ve bakım gereksinimlerini azaltmak için bu bileşenlerin tasarımını ve malzemesini optimize etme konusunda fikir verebilir.

4. Hidrolik Sistem Analizi: Hidrolik sistemin tasarımı, kırıcının ayarları ayarlama ve aşınmayı yönetme yeteneğini etkiler. Hidrolik basınç ve akış dinamiklerinin analiz edilmesi, sistemin verimli bir şekilde çalışmasını ve malzeme sertliğindeki ve besleme boyutundaki değişikliklere uyum sağlayabilmesini sağlar.

5. Aşınma ve Yıpranma: Zamanla, manto ve konkavdaki aşınma ve yıpranma, kırıcının performansını etkileyebilir. Aşınma modellerinin düzenli olarak izlenmesi ve analizi, bileşenlerin ne zaman değiştirilmesi gerektiğini tahmin etmeye ve daha dayanıklı parçalar tasarlamaya yardımcı olur.

## 3. Tasarım Hususları

Tasarım hususları mekanik ekipmanlar için önemli olup, ekipman verimini etkilemektedir. Konik kırıcılarda da bu durum önem arz etmektedir. Konik kırıcı tasarımı, dönen eksantrik şaft ve sabit konkav astar prensibine dayanır. Eksantrik şaft, konkav bir astarla kaplı bir haznenin içine yerleştirilir. Eksantrik şaft döndükçe, manto ile konkav arasında bir kırma eylemi yaratır. Malzeme ezilir ve makinenin altından boşaltılır.



Konik kırıcı tasarımı ayrıca kırılan malzemenin boyutundan ve şeklinden de etkilenir. Malzemenin boyutu ve şekli, onu kırmak için gereken kuvvet miktarını etkiler. Bu nedenle, kırıcı tasarımı, basınç dayanımı, sertliği ve aşındırıcılığı dahil olmak üzere malzeme özelliklerini dikkate almalıdır. Bu sebeple tasarım hususlarına önem verilmeli ve buna göre dizayn yapılmalıdır.

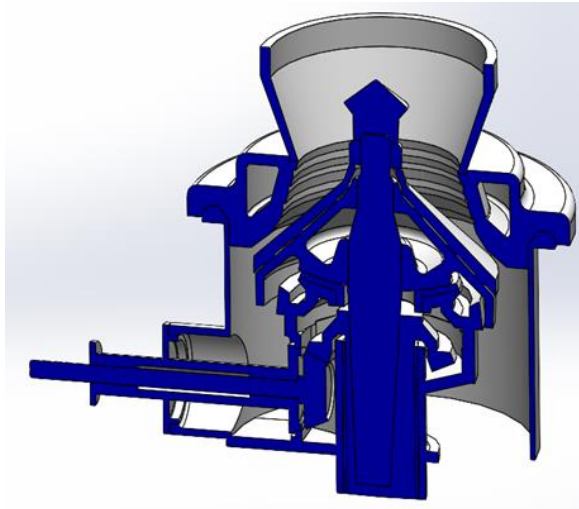
1. Sağlık ve Dayanıklılık: Tasarım, aşırı sıcaklıklar ve aşındırıcı malzemeler de dahil olmak üzere zorlu çalışma ortamını hesaba katmalıdır. Sağlam bir tasarım, kırıcının sık sık arızalanmadan bu koşulların üstesinden gelebilmesini sağlar.

2. Bakım Kolaylığı: Yapısal tasarım, bakım ve onarımlar için kritik bileşenlere kolay erişimi kolaylaştırmalıdır. Buna bileşen değişimi ve yağlama hususları da dahildir.

3. İşletme Verimliliği: Tasarım, enerji tüketimini en aza indirirken verimi en üst düzeye çıkarmak için kırma sürecini optimize etmelidir. Bu faktörlerin denetlenmesi, önemli işletme maliyeti tasarruflarına yol açabilir.

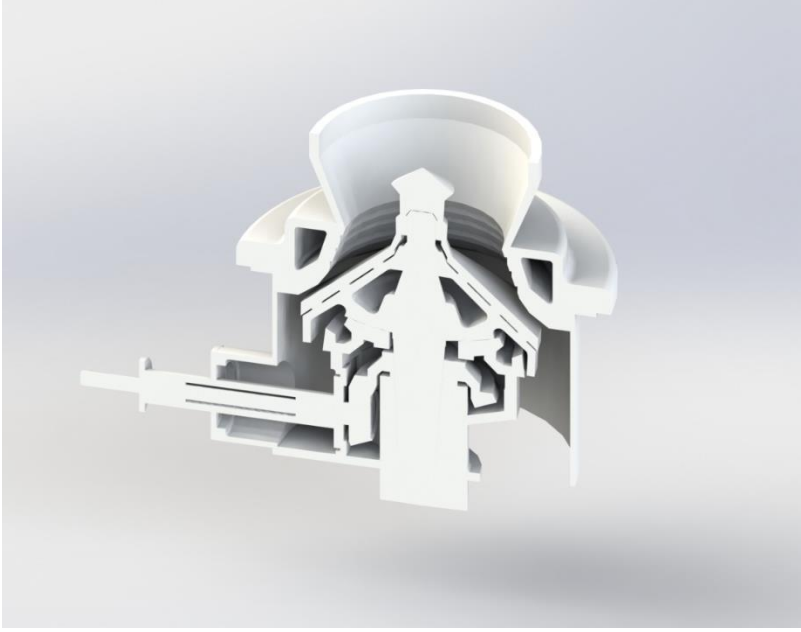
### 3.1. Konik Kırıcı Tasarım Hususları: Optimum Performans İçin Önemli Faktörler

Konik kırıcılar, sert ve aşındırıcı malzemeleri etkili bir şekilde kırma yetenekleriyle tanınan madencilik ve inşaat endüstrilerinde vazgeçilmezdir. Tasarımları, performanslarını, dayanıklılıklarını ve operasyonel maliyet etkinliğini belirlemede önemli bir rol oynar.



Şekil 1. Konik Kırıcı Kesit Görüntüsü

Konik kırıcıya ait CAD görünümü ise Şekil 2’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Konik Kırıcı CAD Gösterimi

Bir konik kırıcı tasarlarırken veya seçerken, optimum işlevsellik ve uzun ömür sağlamak için birkaç kritik husus ele alınmalıdır.

### **3.2. Kırma Odası Tasarımı**

Kırma odasının tasarımı, kırıcının performansını önemli ölçüde etkiler. Oda, içbükey (sabit parça) ve mantoyu (hareketli parça) içerir. Tasarımı etkileyen birkaç faktör vardır:

#### **3.2.1. Oda Geometrisi**

Kırıcı tasarımında iç oda şekli önemli olup, dizayna ihtiyacı vardır. Odanın şekli ve boyutu, işlenen malzemeye göre uyarlanmalıdır. Örneğin, dik açılı bir oda daha ince kırma için etkiliyken, daha sığ açılı bir oda kaba kırma için kullanılabilir. Oda geometrisinde önemli olan birkaç husus şunlardır.

- ✓ Manto ve Konkav Profiller: Bu bileşenler, malzeme türüne ve gerekli çıktı boyutuna uyacak şekilde tasarlanmıştır. Farklı profiller, artan verim ve ya iyileştirilmiş ürün şekli gibi çeşitli avantajlar sunar.

✓ Hidrolik sistem: Modern konik kırıcılar genellikle performanslarını ve kullanım kolaylığını artıran bir hidrolik sisteme sahiptir. Önemli hususlar şunlardır:

- Otomatik ayarlama: Hidrolik sistemler, kırıcı ayarlarının otomatik olarak ayarlanmasını sağlar, bu da tutarlı ürün boyutunun korunmasına yardımcı olur ve operasyonel verimliliği artırır.
- Aşırı yük koruması: Hidrolik tahliye sistemleri, kırıcıyı kırılmayan malzeme veya aşırı yükler nedeniyle oluşan hasardan korur, böylece duruş süresini ve bakım maliyetlerini azaltır.
- Malzeme ve Aşınma Parçaları: Bir konik kırıcının dayanıklılığı ve verimliliği büyük ölçüde yapımında kullanılan malzemelerden etkilenir.
- Malzeme Kalitesi: Manto, konkav ve diğer aşınma parçalarının aşındırıcı malzemelerin ezilmesinin yarattığı gerilimlere dayanması için yüksek kaliteli, aşınmaya dayanıklı malzemeler gereklidir.
- Aşınma Ömrü: Tasarım, bu bileşenlerin aşınma ömrünü en üst düzeye çıkararak değiştirme ve bakım sıklığını azaltmalıdır.
- Besleme ve Tahliye Tasarımı: En iyi kırıcı performansı için etkili malzeme elleçleme çok önemlidir.
- Besleme Açıklığı Besleme açıklığının tasarımı, malzemenin kırıcıya nasıl sokulduğunu etkiler. İyi tasarlanmış bir besleme açıklığı, malzemenin sabit ve eşit bir şekilde akmasını sağlayarak tıkanma riskini azaltır ve verimi artırır.
- Boşaltma Alanı: Boşaltma alanı, çıkış malzemesini verimli bir şekilde işleyecek, birikmeyi önleyecek ve sorunsuz bir çalışma sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.
- Tahrik Mekanizması: Motor ve dişli kutusu dahil olmak üzere bir konik kırıcı tahrik mekanizması, genel verimliliğinde ve güvenilirliğinde rol oynar.
- Güç Gereksinimleri: Tahrik sistemi, beklenen maksimum yükleri ve çalışma koşullarını karşılayacak şekilde uygun şekilde boyutlandırılmalıdır.

Verimlilik: Verimli tahrik mekanizmaları, enerji tüketiminin ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına katkıda bulunur.

- Soğutma ve Yağlama: Uygun soğutma ve yağlama, kırıcının performansını ve uzun ömürlülüğünü korumak için hayati önem taşır:
- Soğutma Sistemleri: Etkili soğutma sistemleri, erken aşınmaya veya arızaya neden olabilecek kritik bileşenlerin aşırı ısınmasını önler.

- Yağlama: Yeterli yağlama, hareketli parçalardaki sürtünmeyi ve aşınmayı azaltarak sorunsuz bir çalışma sağlar ve kırıcının kullanım ömrünü uzatır.
  - Bakım ve Erişebilirlik
 Tasarım hususları ayrıca bakım kolaylığını da ele almalıdır:
  - Erişebilirlik
 Arıza süresini en aza indirmek için bileşenlere muayene, bakım ve değiştirme için kolayca erişilebilmelidir.
  - Servis Edilebilirlik
 Tasarım, hidrolik sistem ve aşınan parçalar gibi kritik bileşenlerin basit bir şekilde servis edilmesine olanak sağlamalıdır.
  - Çevre ve Güvenlik Faktörleri
 Modern konik kırıcılar, çevre ve güvenlik hususları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır:
  - Gürültü ve Toz Kontrolü
 Etkili gürültü ve toz bastırma sistemleri, düzenleyici gereklilikleri karşılamaya ve çalışma koşullarını iyileştirmeye yardımcı olur.
  - Güvenlik Özellikleri
 Güvenlik kilitlemeleri ve acil durum kapatma sistemleri, operatörleri ve bakım personelini korumak için çok önemlidir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bir konik kırıcı tasarlamak, performansı, verimliliği ve uzun ömürlülüğü optimize etmeyi amaçlayan karmaşık bir faktör etkileşimini içerir. Sürdürülebilirlik açısından tasarım parametrelerinin planlanması ve imalatta uygulanması önem arz etmektedir. İçsel tasarımlar bu konuda başı çekmektedir. Kırma odası tasarımı, hidrolik sistemler, malzeme kalitesi, besleme ve boşaltma mekanizmaları, tahrik sistemleri, soğutma ve yağlama, bakım erişilebilirliği ve çevresel ve güvenlik faktörlerini dikkatlice göz önünde bulundurularak, üreticiler madencilik ve inşaat endüstrilerinin zorlu taleplerini karşılayan koni kırıcılar yaratabilirler. İyi tasarlanmış bir koni kırıcı yalnızca üretkenliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda güvenilirliği sağlar ve kullanım ömrü boyunca işletme maliyetlerini azaltır.

### **Kaynakça:**

- 1-Anonim, Kırma ve Öğütme İşlemleri, Kırıcılar, Değirmenler, <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.academia.edu/3549054>  
3/Kırma\_ve\_öğütme\_işlemleri\_kırıcılar\_değirmenler+&date=2019-07-26, (Son Erişim Tarihi: 12.08.2023).
- 2- SETKAYA, S., 2019. Konik Kırıcı Manto Grubu Kuvvet Analizi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- 3- Evertsson, C. M. (2015). Cone crusher performance, Doctoral Dissertation, Chalmers University Technology, Sweden. 2015.
- 4- Napier-Munn, N., Morrell, S., Morrison, R.D., Kojovic, T. (1996); Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization, JKMR, Brisbane, pp.413.
- 5- Andersen, J.S. and Napier-Munn, T.J. (1988); Power Prediction for Cone Crushers, 3rd Mill Operators Conference, AusIMM, Cobar, Australia.
- 6- Arman, Y., 2014. Kırma-Elleme ve Taşıma Makineleri- Seminer Notları, (25.12.2014), Ankara.
- 7- Çıktı E. (2015). Kırıcı ve öğütücülerde kullanılan demir esaslı malzemelerin yapı, mekanik özellikler ve aşınma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 8- Zhang, Z., Chen, S. and Yang, Y. (2015). Cone crusher in the cylindrical roller bearing contact analysis. Atlantis Press, 30(3), 1657-1661.

### **3. Bölüm**

## **Denizel Ortamlarda Oluşan Yumuşak Sediment Deformasyon Yapıları**

**Calibe KOÇ TAŞGIN<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Prof. Dr.; Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Bölümü. [calibekoc@firat.edu.tr](mailto:calibekoc@firat.edu.tr)  
ORCID No: 0000-0002-5439-7379

## ÖZET

Yumuşak sediment deformasyon yapıları sedimentin konsolidasyonunun ilk aşamalarında, sedimantasyon sırasında veya hemen sonrasında gelişir. Bunun nedeni, deformasyonun meydana gelmesi için tortuların "sıvı benzeri" veya katılaşmamış olması gerektiğidir. Bu yapılar; deformasyon mekanizmasına göre; genel olarak sediment duraysızlığı, sıvılaşma, akışkanlaşma (akıcı hale gelme) ve yükleme ile ilişkili oluşan yapılar şeklinde gruplandırılmıştır. Diğer bir sınıflandırma şekli de morfolojik özellikleridir. Yumuşak sediment deformasyon yapıları farklı ortamlarda oluşabilmektedir. Bunlardan biri de denizel ortamlardır. Denizel ortamlarda farklı derinliklerde, farklı litolojilerde oluşan deformasyon yapılarına dünyadan birçok örnek verilebilir. Bunlardan bazıları; Açık-deniz çökellerinde oluşan büyük ölçekli oygu-dolgu yapıları (Geç Albiyen-Senomaniyen çökelleri, Grajau Havzası, Kuzey Brezilya), Kambriyen yaşlı fırtına çökellerinde (Shandong Bölgesi, Çin) gözlenen yumuşak sediment-deformasyon yapıları, karbonat istiflerinde gözlenen kayma-oturma yaygıları (Apulian Karbonat Platformu) ve türbiditik çökellerde gözlenen asimetric yumuşak sediment deformasyon yapılarıdır (Geç Miyosen, Guadix Havzası, Güney İspanya). Bu yapılar incelenmiş ve sonuç olarak farklı denizel ortamlar ve farklı litolojilerde (kırıntılı-karbonatlı denizel çökellerde) oluşan yumuşak sediment deformasyon yapıları karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yumuşak sediment deformasyon yapıları, denizel ortamlar, deformasyon mekanizması, tetikleme mekanizması

## 1. GİRİŞ

Sedimentler genellikle tabakalı olarak çökler. Depolanma sırasında; çapraz tabakalanma, dalga ripilı veya yatay laminasyon oluşur. Bunlar birincil sedimanter yapılar olarak tanınırlar. Eğer sediment yumuşaksa orijinal tabakalanma ve bu sedimanter yapılar su hareketi ve gravite ile ilişkili etkilerle değişikliğe uğrayabilir. Sedimanter tabakaların bozulması, depolanma sırasında veya sediment taşlaşmaya başladığı zaman ki herhangi bir anda oluşabilir. Yumuşak sediment deformasyon, yeni çökelmiş sediment tabakasının fabrik ve tabakaların değişmesi için kullanılan bir terimdir.

Yumuşak sediment deformasyon denizin farklı derinliklerinde ve farklı litolojilerde oluşabilmektedir. Çeşitli boyutlarda ve değişik şekillerde yapılar şeklinde gözlenmektedir. Bu çalışmada farklı tetikleme mekanizmaları ile oluşmuş, denizin farklı derinliklerinde yani farklı ortamlarda ve farklı litolojilerde tanımlanmış yumuşak sediment deformasyon yapılarının özellikleri verilmiştir. Bu yapılar hem kırıntılı hem karbonat çökellerde gözlenmekte olup, oluşumları karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

## 2. DENİZİN FARKLI DERİNLİKLERİNDE VE FARKLI LİTOLOJİLERDE OLUŞAN YUMUŞAK SEDİMENT DEFORMASYON YAPILARI

### 2.1. Açık deniz çökellerinde (yüksek enerjili üst kıyı yüzü) gözlenen oygu ve dolgu yapılarının tanımı

Açık deniz çökellerinde oygu ve minör boyutta hamaksı çapraz tabakalanma tanımlanmış olup bu yapılar yüksek enerjili üst kıyı yüzü ortamını yansıtır (Dott ve Bourgeois, 1982; Walker, 1984; Rossetti vd., 2000).

Oyulmuş yüzeyleri düzenli bir şekilde hemen yanındaki oygulara benzer boyutta hamaklar tarafından ayrılan büyük ölçekli teknelerden oluşur. Tekne-tekne, hamak-hamak mesafesi ortalama 15-20 m'dir. Bir kaç lokasyonda bazı oygular 40 m genişliğe kadar ulaşabilir. Yüzey boyunca oygu ve hamaklar tarafından oluşturulan rölyef ortalama 0,3-1,2 m'dir. Dalga boyu ve yüksekliği oranı 50'ye ulaşır. Oygular, simetrik veya asimetrik şekiller gösterirler. 20°-30° arasında açıyla dalım yaparlar. Oyguların tabanı, hamakların tepesi küçük ölçekli oygular içerir (Rossetti vd., 2000).

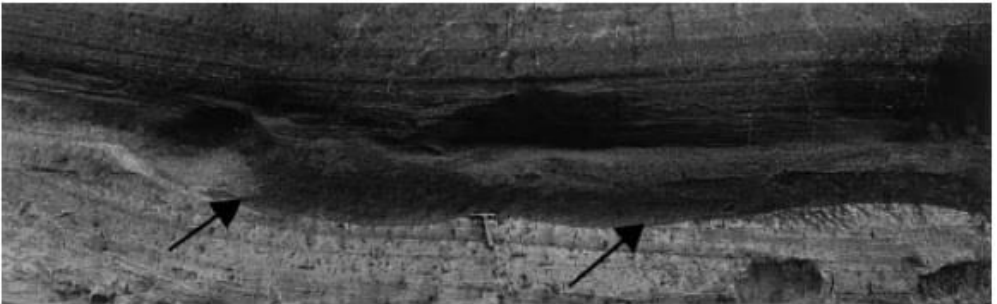
Oygular iyi boylanmış ve orta-iyi derecede yuvarlaklaşmış ince taneli kumlarla doldurulmuştur. Ana sedimanter yapı hafif dalgalı, hamaklara doğru incelen, teknelere doğru kalınlaşan yatay ve çok düşük açılı laminalardan oluşur (Şekil 2.1 ve 2.2). Dalgalı laminasyon oygu morfolojisine uyumludur ve taban yüzeye paraleldir. Dalgalı laminalar çok hafif bir şekilde dalım yapan erozyonal yüzeyler tarafından izlenir. Alttaki laminaların tepe kısımlarını keserler ve son olarak böyle yüzeyler, laminalarla uyumlu bir şekilde örtülürler. Sonuç olarak tepesi kesik



yüzeyle daha devamlı ve tabakalanmaya paralel olana dek dalgalıdır. Sediment dolgusunun iç yapısı farklıdır. 1.5 m kalınlığa ulaşır. Küçük orta ölçekli kuzey doğuya doğru eğimli düşük açılı çapraz tabakalardan oluşur. Bu çapraz tabakaların bazıları ya simetrik ya da asimetrik ripıllar tarafından üzerlenir. Dalgalı laminalar yanall olarak küçük ve orta ölçekli oyu, tekne ve tümseksi çapraz tabakalara geçiş gösterirler. Oyu ve teknesi çapraz tabakalardan alınan eski akıntı ölçümleri kuzey doğuya doğru bir akış yönü gösterir. Çalışma alanında oydu ve dolgu yapıları içeren çökellerde lokal olarak konvolüt laminasyon, tabaka çökme yapıları, büyük ölçekli kıvrımlar, masif tabakalanma, kum dolgululu çatlaklar, formasyon içi breşler yer alır. Benzer özellikler, stratigrafik olarak korele edilebilir tabakalar içerisinde çalışma bölgesinin birkaç kilometre kuzey doğusunda gözlenmiştir (Rossetti vd., 2000).



**Şekil 2.1.** Açailandia (kuzey Brezilya) yakınında oluşan büyük ölçekli oydu-dolgu yapıları. Kesikli çizgiler bu yapıların tabanındaki dalgalı yüzeyleri gösterir (Rossetti vd., 2000).



**Şekil 2.2.** Büyük ölçekli oyduların detaylı görünüşü. Simetrik ve asimetrik daha küçük ölçekli oyduların birleşmesi ile oluşmuştur (Rossetti vd., 2000).

### **2.1.1. Deformasyon mekanizması**

Pek çok modern ve eski sığ deniz çökelleri, ya lokal yada fırtına ile oluşan akıntılar ile fırtına dalgalarının arttığını kaydetmiştir (Dott ve Bourgeois, 1982; Nottvedt ve Kresia, 1987). Oygu ve dolgu yapılarını oluşturan kombine akışlar; akıntı ve yüksek dalga boyuna sahip tsunami dalgaları ile oluşmuştur (Rossetti vd., 2000).

Fırtına prosesleri ile oluşan benzer oygular Cacchione vd. (1984), Cheel ve Middleton (1993) ve McKie (1994) tarafından tanımlanmıştır. Güney Ontario (Kanada)'nın Silüriyen yaşlı Whirlpool kumtaşları parabolik oygular içerir. Bu oygu ve dolgu yapılarının özellikleri; 1. Üst kıyı yüzü çökelleri ile ilişkilidir. 2. Birkaç desimetreye ulaşan rölyefli büyük ölçekli oygular tekrarlanmalı keskin dalgalı yüzeylere sahiptir. 3. Hem simetrik hem asimetric özellik gözlenir. 4. Üst yüzeyde simetrik ve asimetric küçük ölçekli oygular yer alır.

Bu örnekte tanımlanan oygu-dolgu yapılarına benzer özellikte yapılar hem Geç Permiyen yaşlı Brotherton Formasyonu, UK (McKie, 1994) hem de Kuzey Brezilya'da Sao Luis Havzası'nda Kretase çökellerinde gözlenmiştir. Brotherton Formasyonu'nda oygularda tekrarlanma gözlenmemiştir. Sao Luis havzasındaki Kretase çökellerindeki oyguların sediment dolgusu yapısal olarak farklıdır. Büyük ölçekli çok düşük açılı eğime sahip çapraz tabaka setlerinden oluşur. Bunlar gel-git akıntıları ile fırtına akıntılarının etkileşiminden oluşmuştur. Depremlerle oluşan tsunami dalgaları fırtına dalgalarından çok daha güçlü olarak bilinen dalgalardır. Sedimentasyon sırasında normal fırtına dalgalarından çok daha büyük bir etkiye sebep olurlar. İlaveten, tsunami dalgalarının kıyıya doğru yaklaşımı, saniyede birkaç metre hızda geriye dönen akıntılar oluşturabilir (Shiki ve Yamazaki, 1996). Bu geri dönen kabarmış tsunami dalgaları kombine bir hareket tarafından karakterize edilen akıntılara sebep olabilir. Böyle akışlar fırtına oluşumlu akıntılardan daha güçlü akıntılar ile oluşabilir ve bütün mevcut tane boylarını taşıyabilir (Pickering vd., 1991; Rossetti vd., 2000).

Bu yapıları içeren çökellerin Geç Kretase sırasında aktif olan ana doğrultu atımlı fay zonuna yakın olması, faylanmış blokları işaret eden deforme olmuş aralıklar içermesi, yanal olarak devamlı olması ve deforme olmamış tabakalar arasında oluşan çok çeşitli yumuşak sediment deformasyon yapılarının varlığı sismik olarak oluştuğunu destekler (Rossetti vd., 2000).

### **2.1.2. Tetikleme Mekanizması: Tsunami**

Brezilya'nın kuzeyinde Grajau Havzası'nın Geç Albiyen-Senomaniyen çökellerinde gözlenen büyük ölçekli oygu-dolgu yapıları tsunami dalgaları ile oluşmuştur.

## **2.2. Silisiklastik ve karbonat fırtına çökellerinde gözlenen yumuşak sediment deformasyon**

Bu örnek Çin'in Shandong Bölgesi'nde Kambriyen yaşlı silisiklastik ve karbonat fırtına çökellerinde gözlenen yumuşak sediment deformasyon yapılarıdır.

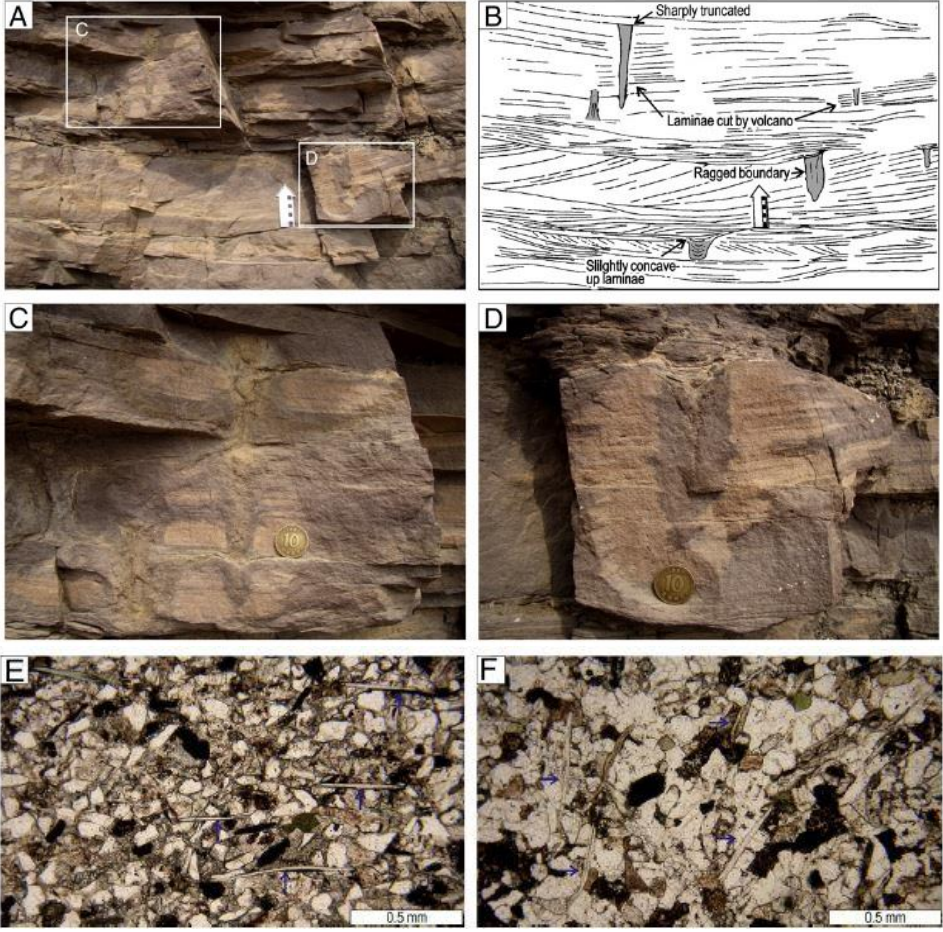
### **2.2.1 Silisiklastik fırtına çökellerinde gözlenen yumuşak sediment deformasyon yapıları**

#### **Kum Volkanları**

Kum volkanları, nispeten kalın (birkaç metre) hamaksı çapraz tabakalı ince taneli kumtaşlarından oluşur (Şekil 2.3. A, B). Enine kesitte, çevredeki deforme olmamış kumtaşları (Şekil 2.3 A-D) ile nispeten düzensiz kenarları ile ayrılan sütun şekillere sahiptir. Tabaka düzlemleri üzerinde, kum volkanlarını çevreleyen kumtaşı içindeki krater benzeri çöküntülere sahiptir. Volkanların dikey kanalları 3 ile 15 cm genişlikte, 1 ile 7 cm derinliğe sahiptir ve her bir kanal yukarı doğru biraz daha genişlemektedir. Kum volkanları alttaki kumtaşı tabakaları veya kumtaşı tabakalarının taban kısmından başlatılır. Bu yapılar ya üzerleyen tabakaya karşı keskin bir şekilde sonlandırılabilir yada volkanik koni ve kraterler olarak kalırlar. Buradaki laminalar (her ikisi de sadece küçük genlikli, 1cm'den küçük) kraterin içine doğru önemsiz miktarda konkav şekildedir. Bol muskovit parçacıklar genel olarak deforme olmamış kumtaşı (Şekil 2.3E) içinde yatak düzlemine paralel yönlendirilmiş, ancak kum volkanları (Şekil 2.3F) arasında dikey kanallar içinde daha çok eğimlidir (Chen ve Lee, 2013).

#### **Kum Yastıkları**

Kum yastıkları (Şekil 2.4A), hamaksı çapraz tabakalı ince kumtaşı tabakalarında bulunmaktadır. Kum yastıkları yaklaşık 16 cm kalınlığında ve 20-40 cm genişliğindedir. Yastıkların merkezi masif büyük ya da hafifçe laminalı ince kumtaşlarından ve kenarları ise ince laminalı kumtaşlarından oluşur (Şekil 2.4A-D). Kenar laminaları genellikle içbükey ve yastıkların dış kısmı boyunca yukarı doğru kavislidir. Laminalar kuvars tanelerinden ve dağınık yönelimli tabakalı muskovit parçalarından oluşur. Yastık yapılarını içeren seviye belirgin bir sınırla hamaksı çapraz tabakalı kumtaşları tarafından üzerlenir. Bu kumtaşları düşük oranda deforme olmuştur (Chen ve Lee, 2013).



**Şekil 2.3.** Hamaksı çapraz tabakalı kumtaşlarında gözlenen kum volkanları. A. Birkaç seviyede gözlenen kum volkanları (ölçek 10 cm). B. A'nın çizgisel görünümü, kum volkanlarının detaylı özelliklerini göstermektedir. C. Tepe kısmı kesik yüzeylerle sonlanan kum volkanlarının yakından görünümü, D. Krater içeren kum volkanının yakından görünümü. E. Deforme olmamış kumtaşlarında tabaka düzlemine paralel muskovit taneleri (mavi oklar), F. Kum volkanının içerisinde düşeye yakın eğime sahip muskovit taneleri (Chen ve Lee, 2013).

## 2.2.2. Karbonat fırtına çökellerinde gözlenen yumuşak sediment deformasyon yapıları

### Sedimanter dayklar

Sedimanter dayklar kalın (2 m) hamaksı çapraz tabakalı pelloidal tanetaşı biriminden oluşur. Dayklar yaklaşık birkaç milimetre-santimetre genişlikte, birkaç santimetre-desimetre kalınlıktadır. Düşey kesitte dike yakın eğimli ve düşey gözlenir. Pipe veya duvar gibi yapılar lokal olarak çatallanmış, birleşik ve

bağlantılıdır. Daykların duvarları genellikle düz, sinüslü bir şekilde deforme olmamış tanetaşlarını keser. Uzamış peloidal tanetaşı intraklastları dayklara paralel yönelmiştir. Sedimenter daykları oluşturan tanetaşı masif veya kabaca laminalıdır. Dayklar içerisindeki kalsit taneleri sık sık daykların duvarlarına paralel yönelmiştir. Plan görünüşte, dayklar duvar benzeri geometri gösterir. Dayklar sık sık tanetaşı matriksli kireçtaşı breşleri ile ilişkilidir (Chen ve Lee, 2013).

### **Tanetaşı matriksli breşler**

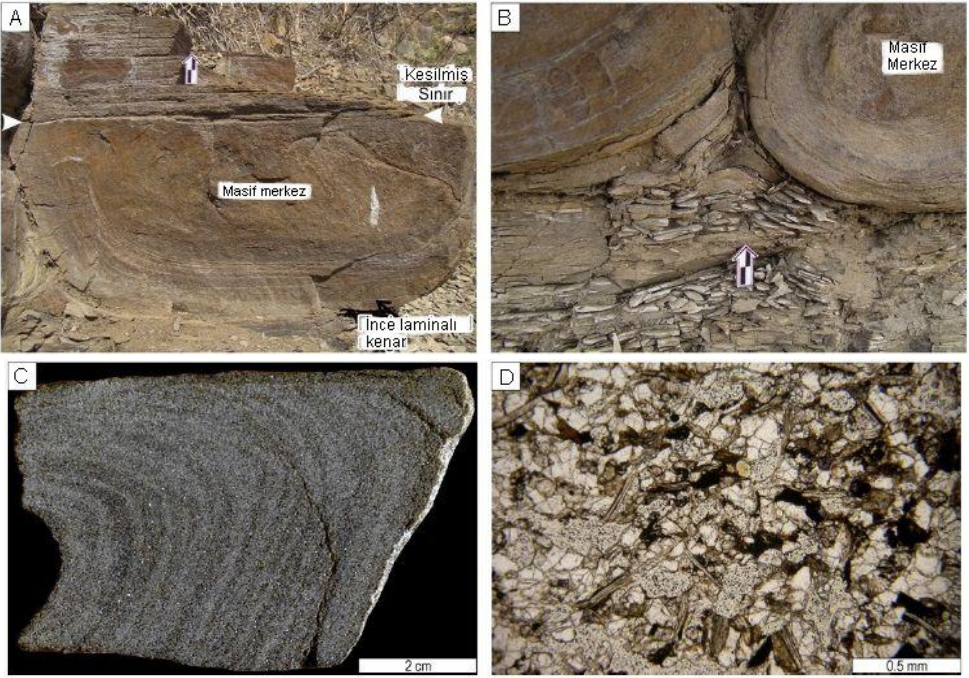
Tanetaşı matriksli breşler deforme olmamış hamaksı çapraz tabakalı peloidal tanetaşı içerisinde uyumsuz bir şekilde oluşur. Huni, kanal ve çatlak benzeri veya daha şekilsiz olarak gözlenirler (Şekil 2.5A-C). Breş kütleleri cm-dm boyutunda olup deforme olmamış tanetaşlarına ya belirgin ya da düzensiz sınırlarla geçiş gösterir (Şekil 2.5D). Breşler tane ve matriks destekli, monomiktik peloidal tanetaşı bileşenlerinden ve tanetaşı matriksten oluşur. Bileşenler bileşim, doku ve yapı olarak hemen bitişiğindeki deforme olmamış tane taşına benzerlik gösterir (Chen ve Lee, 2013).

### **Deforme olmuş çapraz tabakalar**

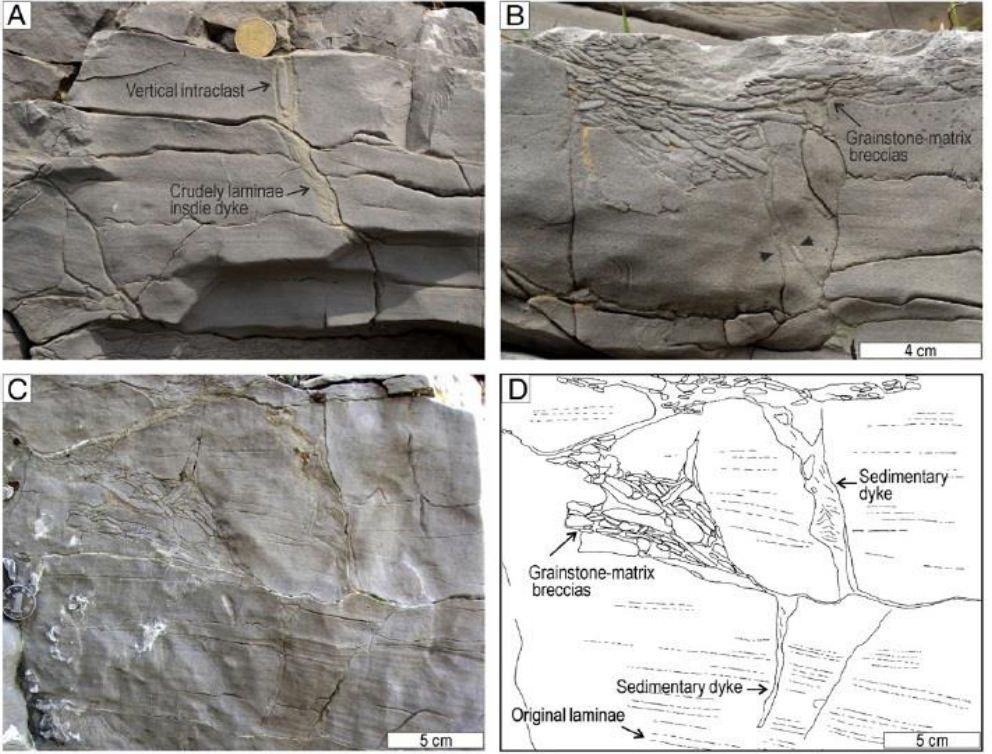
Deforme olmuş çapraz tabakalar hamaksı çapraz tabakalı peloidal tane taşlarında gözlenmiştir. Bu tabakalar dolomitik marınlarla ara tabakalıdır. Deforme olmuş çapraz tabakalar hem kaotik iç yapıya sahip düzensiz bir morfoloji (Şekil 2.6A) hem de kıvrım benzeri bir geometriye sahiptir. Kıvrım eksenleri belirgin bir yönelme gösterir (Şekil 2.6B). Üç boyutlu yüzeyleme uygun olmadığından tam bir yönelme değeri okunamamıştır. İnce peloidal tanetaşı tabakaları lokal olarak bükülmüştür (konkav), kısmen breşleşmiş ve yeniden yönelmiştir (Şekil 2.6C). Deforme olmuş çapraz tabakalanmalar genellikle su kaçma yapıları ile ilişkilidir (Chen ve Lee, 2013).

### **Marn matriksli kireçtaşı breşleri**

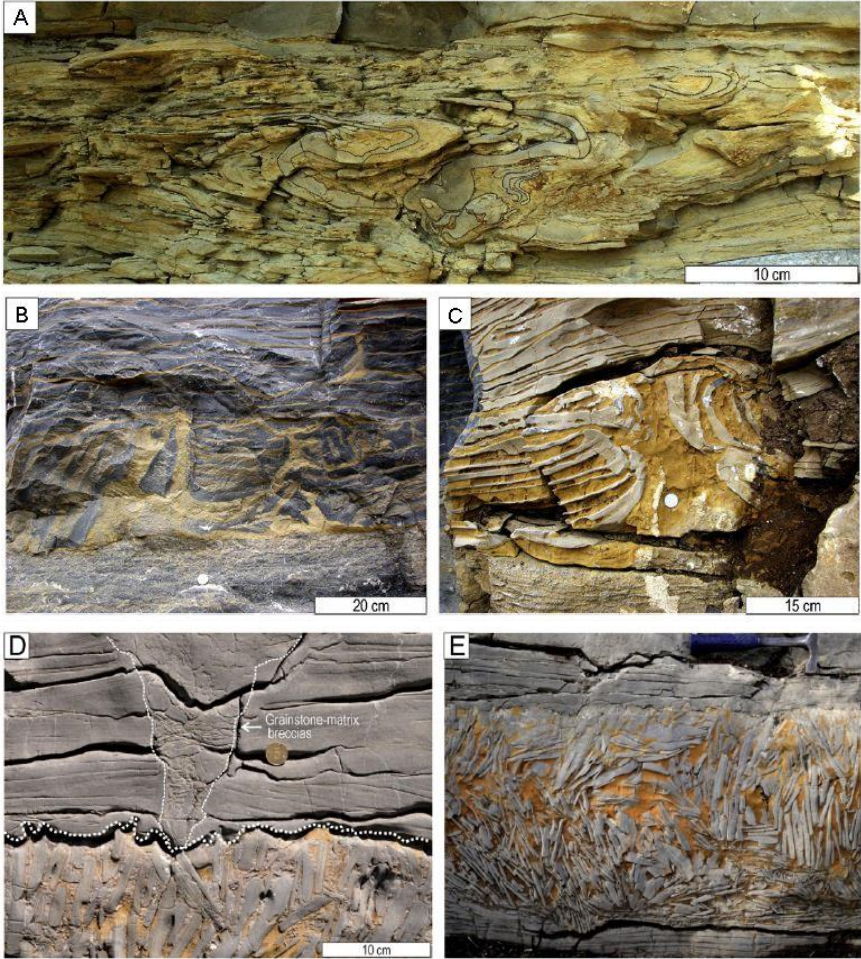
Marn matriksli breş kütleleri çeşitli boyutlarda (20-12 cm genişliğinde, 10-60 cm yüksekliğinde), tümsek veya düzensiz şekiller sunar. Breş mercikleri dereceli bir şekilde yanal yönde deforme olmamış peloidal tanetaşı tabakaları içerisine geçiş gösterirler ve tanetaşı matriksli breşlerle ilişkilidirler (Şekil 2.6D). Breşler homojen dolomitik marın taşı ve lokal olarak laminalı mikritik kireçtaşı matriksli monomiktik peloidal tanetaşlarından oluşur (Şekil 2.6E). Taneler genellikle açılı-yarı açılı köşelere sahip düzensiz levhamsı şekilde, çakıl-iri çakıl boyutunda, ortalama 10 cm, maksimum 35 cm boyutundadır (Chen ve Lee, 2013).



**Şekil 2.4.** Hamaksı çapraz tabakalı kumtaşlarında gözlenen kum yastıkları. A. Masif bir merkeze, ince laminalı bir kenara sahip kum yastığının yakından görünüşü. Yastık yapısının üst kısmı tepesi kesilmiştir. Ölçek 2 cm. B. Altta çamurtaşının yukarıya doğru sokulumunun yakından görünümü. C. Dönmüş kenar laminalarını gösteren parlatılmış örnek. D. Kum yastıkları içerisinde organize olmamış (çoğunlukla düşeye yakın eğimli) muskovit taneleri (Chen ve Lee, 2013).



**Şekil 2.5.** Hamaksı çapraz tabakalı peloidal tanetaşında gözlenen sedimanter dayklar. A. Eğimli ve düşey dayklar, kaba laminalar ve intraklastlar içeriyor. B. İki dayk birleşir ve ilerlemeli bir şekilde tanetaşı matrisli kireçtaşı breşlerine dönüşür. C. Bağlantılı dayklar ve tanetaşı matrisli breşler. D. C'nin çizgisel görünümü (Chen ve Lee, 2013).



**Şekil 2.6.** A. Kıvrım benzeri geometriye sahip deforme olmuş çapraz tabakalanma. B. Kaotik ve lokal olarak breşleşme gösteren deforme olmuş çapraz tabakalanma. C. Su/akışkan kaçma yapılarına sahip deforme olmuş çapraz tabakalanma. D. Yukarıya doğru alttaki marn matriksli breşlerden deforme olmamış tanetaşına geçişin yakından görünüşü. Stilolitik sınır boyunca huni şekilli tanetaşı matriksli breşler. E. Çeşitli içsel fabrik gösteren marn matriksli breşler (Chen ve Lee, 2013).

### 2.2.3. Deformasyon mekanizması

Silisiklastik sedimentler, sediment tabakası çökeler çökmez erken diyajenez esnasında dereceli olarak gözenek suyunu-havayı atar ve sediment taneleri yeniden düzenlenerek sıkışır (Van Loon, 2009). Erken denizel çimentolanma, erken diyajenez sırasında kırıntılı sedimentlerde genellikle minimal düzeydedir. Kum volkanlarının ve yastık yapılarının tepe kısmı kesik olması deformasyonun su-



sediment ara yüzeyinde veya yüzeyin birkaç santimetre-desimetre altında olduğunu gösterir (Burne, 1970; Moretti ve Sabato, 2007; Van Loon ve Maulik, 2011). Ya deniz tabanında yada sığ gömülme altında kumlu sediment fazla gözenekli ve geçirgendir, gözenekler tuzlu su ile doludur ve devirsel makaslama gerilmesi etkisi altında sıvılaşma ve su kaçmaya yardımcı olurlar. Erken denizel çimentolanma karbonat kayaçlarda yaygındır (James ve Choquette, 1990; Cowan ve James, 1992; Demicco ve Hardie, 1994). Bu çalışmada yüzeydeki peloidal sedimentler gevşek bir şekilde paketlenmiştir fakat gömülmeden kısa süre sonra deniz/gözenek suyundan  $\text{CaCO}_3$  çökelmiştir (Molenaar ve Zijlstra, 1997). Karbonat kayaçlarda gözlenen yumuşak sediment deformasyon yapılarının tepe kısımları kesik değildir. Karbonat kayaçlar deniz tabanında erozyon ile yüzeylenmez ve üzerleyen tabakanın çökmesinden sonra oluşur. Sığ gömülme şartları altında, erken kısmi çimentolanma sediment bileşimine, hidrolik şartlara ve gözenek suyu doygunluğuna bağlı olarak homojen değildir (Bouchette vd., 2001, Chen vd., 2009b, 2011). Erken çimentolanma sonucu karbonat kayaçların geçirirliliği önemli bir şekilde azalır (Budd, 2002). Diğer yönden killi sedimentlerin erken çimentolanması daha düşük orandadır. Bu durum ara katmanlanmalı killi ve peloidal sedimentlerin farklı özelliklerinden kaynaklanır. Bütün bu özellikler, karbonat sedimentleri, heterojen deformasyona (sıvılaşma/su kaçma, kıvamlı sıvılaşma ve breşleşme) kolay maruz bırakır (Chen ve Lee, 2013).

Silisiklastik kumlu sedimentler ya deniz tabanında yada sığ gömülme şartları altında, eğer dış stres uygulanıyorsa sıvılaşır ve/veya akıcı hale gelir. Akıcı hale gelmiş sedimentin, deniz tabanına yani yukarıya doğru kaçıışı kum volkanlarının oluşumu ile sonuçlanır (Burne, 1970; Neumann-Mahlkau, 1976; Nichols vd., 1994; Moretti vd., 1999; Moretti ve Sabato, 2007). Bu örnekteki kum volkanlarında eğimli ve düşey muskovit taneleri, bu tanelerin yukarıya doğru enjeksiyonu veya akıcı hale gelmiş sedimentin aşağıya doğru battığını yansıtır (Braccini vd., 2008; Scott vd., 2009; Chen vd., 2011; Hurst vd., 2011). Diğer yandan, kumlu sedimentler masif veya laminalı yapıya sahip olsa da sıvılaşma ile homojen hale dönüşebilir. Eğer ters yoğunluk sistemi (yüksek yoğunluklu kumlu sedimentler, düşük yoğunluklu çamurlu sedimentlerin üzerinde ise) varsa, çamurlu sedimentler sıvılaşmış kumlu sedimentler içerisine yukarıya doğru kolay bir şekilde sokulum yapar (sıvılaşma sırasında kumlu sedimentlerin makaslama gerilmesi kaybı nedeniyle) ve alev-yük yapıları (örneğin kum top ve yastıkları) oluşur. Bu çalışmadaki kum yastıkları sınırlı sıvılaşma derinliği nedeniyle alttaki çamurlu sedimentler ve üzerindeki homojen kumlu tabakalar arasında sıvılaşmamış laminalı kumlu tabakalarda bulunur. Deformasyon sırasında ince laminalı tabakalar kumlu sedimentlerin yüklenmesi ve çamurlu sedimentlerin sokulumu sonucu bükülür. Bu yapıların kenar kısımları laminalı iken merkezi kısımları masifdir. Karbonatlı

sedimentler gözenek dolgularının kalsit ile erken çimentolanma nedeniyle, gözenek suyundaki kalıntı basınç ile sıvılaşmanın oluşabileceği bir nokta oluşturabilir (Doe ve Dott, 1980; Tsui ve Hefrich, 1983; Clukey vd., 1985). Sıvılaşma ve sonradan gelişen su kaçma olayı karbonat sedimentlerin heterojen çimentolanması nedeniyle sık sık seçicidir. Artan gözenek suyu basıncı tabakaların zayıf bir şekilde çimentolanmış bölümlerini kırabilir ve gevşek tanelerin sıvılaşması ile sonuçlanır. Sıvılaşmış sedimet ve gözenek suyu yoğunlaşır ve sonunda serbest bırakılan fazla gözenek suyu basıncı ile yukarıya doğru göçer. Bu çalışmadaki küçük ölçekli sedimanter dayklar sıvılaşmış/akıcı hale gelmiş sediment ve gözenek suyunun yukarıya doğru yükselişinden oluşmuş olabilir. Akışkanın yukarı doğru enjeksiyonu akıntı sürüklemesi ve sokulumu nedeniyle düşey kanallarda çeşitli laminalar oluşmuştur. Lokal sıvılaşma ve su kaçma olayı tanetaşı matriksli breşlerden oluşmuş olmalıdır. Sıvılaşmış ve akıcı hale gelmiş bölümler matriksi oluştururken, sıvılaşma olmayan iyi çimentolanmış tabakalar taneleri oluşturur. Diğer yönden sıvılaşma ve su kaçma olayı sedimentleri homojen hale getirir ve matriksde masif doku gelişir (Pope vd., 1997; Onasch ve Kahle, 2002; Chen ve Lee, 2013).

Peloidal ve killi tabakaların ara katmanlı olması durumunda, killi tabakalar kıvamlı bir sıvılaşma olayına maruz kalır ve dış güçler sonucu viskoz akış oluşur (Jones ve Omoto, 2000; Gruszka-Tortosa vd., 2011). Basınç artışı ile ince peloidal tabakalar akıcı hale gelmiş killi sedimentlerin yukarıya/yanal hareketi ile deformasyon oluşur. Eğer peloidal tabakalar kısmen çimentolanır ve yarı-sağlam olursa, killi sedimentlerin akışı ve sokulumu breşleşme ve ince peloidal tabakaların tekrar yönlenmesi ile sonuçlanmıştır. Bu durum marn matriksli breşleri oluşturur. Killi sedimentlerin yukarıya doğru kaçışı düşey olarak yönlenmiş tanelerin oluşumuna neden olur.

Sedimentler, kıyı yüzünün düşük açılı yamaçlarında çökelmiştir.

Bu çalışmada soft-sediment deformasyon yapılarını oluşumunu başlatan en muhtemel mekanizma devirsel fırtına dalgalarıdır. Fırtına dalgaları ile oluşan yumuşak sediment deformasyon yapıları (örneğin yük yapıları, sedimentler dayklar, kaymalar ve karbonat breşler) hem genç sedimentlerde (Clukey vd., 1985; Foda vd., 1993) hem de yaşlı çökellerde (Martel ve Gibling, 1993; Molina vd., 1998; Bouchette vd., 2001; Alfaro vd., 2002) tanımlanmıştır (Chen ve Lee, 2013).

#### 2.2.4. Tetikleme Mekanizması: Fırtına hareketleri

Bu örnek Çin'in Shandong Bölgesi'nde Kambriyen yaşlı silisiklastik ve karbonat fırtına çökellerinde gözlenen yumuşak çökel-deformasyon yapılarıdır.

#### 2.3. Düşük eğimli ramp ortamında tanımlanan kayma-oturma yapıları

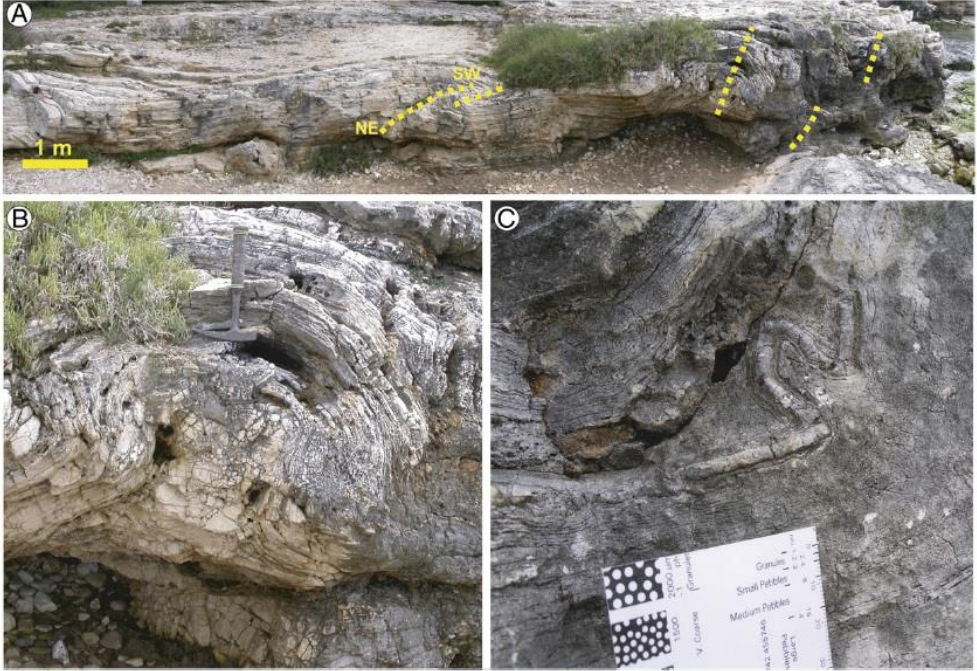
Yumuşak sediment deformasyon yapıları iki ayrı seviyede oluşmuştur (Şekil 2.7). Her iki deforme olmuş birimde kuzeybatıdan güneydoğuya doğru birkaç 100 m, deniz kıyısındaki sarp bölge boyunca izlenebilir. Güney batıya doğru deniz seviyesi altında gözden kaybolur. Fakat deniz tabanında onlarca metre izlenebilir. Deforme olmuş seviyenin yanal devamlılığı yarı düşey bir fay tarafından kesintiye uğratılır. Bu fayın her iki yanındaki tabakaların kalınlığındaki benzerlik, fayın aktivitesinin depolanma sonrası olduğunu gösterir (Mastrogiacomo vd., 2012).

Altındaki deforme olmuş seviye 1,3-1,5 m kalınlığında olup deforme olmamış mikritik kireçtaşlarının üzerine keskin bir sınırla gelmiştir. Deformasyon dereceli bir şekilde deforme olmamış tabakalara doğru (yukarıya doğru) azalır. Tabanda lokal olarak 8 cm kalınlığında breşik bir seviye vardır. A seviyesi kayma-oturma yaygılarının tipik özelliklerini gösterir. Yarı düşey-yarı yatay eksenlere sahip metre ölçeğinde kıvrımlar, kutu tipi kıvrım özelliğinde olup, kıvrım eksen düzlemleri boyunca ayrılmalar gösterir (Mastrogiacomo vd., 2012).



**Şekil 2.7.** İki seviyede yer alan kayma-oturma yaygısının genel görünüşü. Kayma-oturma yaygısı (A) (SSA; sarı renk) 1 ile 1,3 m arasında kalınlığa sahip, kayma-oturma yaygısı (B) (SSB; mavi renk) 0,25-0,35 m kalınlıktadır. İki seviye 3,8-4 m kalınlığında deforme olmamış kireçtaşları ile ayrılır (Mastrogiacomo vd., 2012).

Yatık ve dönmüş kıvrımlar nadirdir. Kıvrımın kapladığı alan değişken olup 0,5 m'den 2,5 m'ye değişir (Şekil 2.8A). Tabaka kalınlığı kıvrım eksen hattı boyunca artar, kanatlar boyunca azalır. Lokal olarak ayrılma yüzeyleri boyunca ve kıvrım merkez kısmında breşler oluşur (Şekil 2.8B). Tipik olarak ince tanelerden oluşur (maks. 1 cm) ve iyi-laminalı çamurtaşları içerir. İz fosilli çamurtaşları ve nadir olarak vaketaşı fasiyesleri içerisinde iri taneler (10-20 cm çapında) gözlenmiştir (Mastrogiacomo vd., 2012).

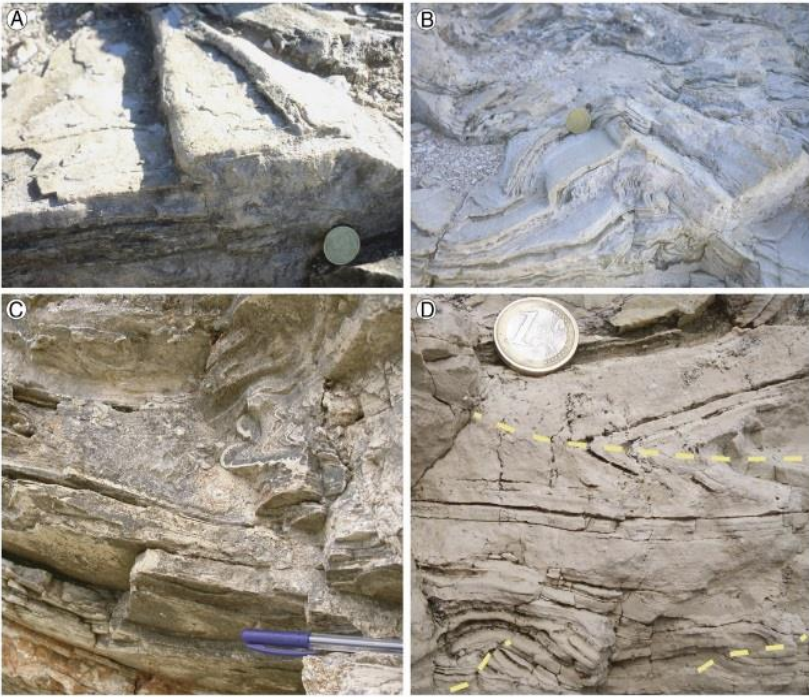


**Şekil 2.8.** Alt kayma-oturma yaygısının (SSA) detaylı görünümü A) Değişen morfolojide, düzensiz şekilli kayma-oturma kıvrımları. B) Merkezindeki lokal breşleşmeyi gösteren kıvrımın detaylı fotoğrafı C) Büyük senkinalde gözlenen parazitik kıvrım (Mastrogiacomo vd., 2012).

Bu kıvrımlar hem ayrılma yüzeyleri hem de aksiyal düzlemler gösterirler ve daha az sıklıkta geriye doğru bindirmeler oluştururlar ( $220^\circ$ , GB'ya doğru). Kıvrım eksen hatları ve aksiyal düzlem dalım yönleri güney batıya doğru taşınma ile GB-KD yönünde kısalma ile uyumludur. Metre ölçeğinde kıvrımların pek çoğu küçük ölçekli kıvrımlar içerir. Bu kıvrımların eksenleri büyük kıvrımlara doğru eğilim gösterir ve parazitik kıvrımlar olarak tanımlanır (Şekil 2.8C). Üst deforme olmuş seviye; 0,25-0,35 m kalınlıkta olup alttan ve üstten deforme olmamış kireçtaşları ile sınırlıdır. Söz konusu deformasyon yapıları laminalı çamurtaşları fasiyeslerinde

gelişmiştir ve tipik olarak kayma-oturma yapısı özelliği gösterir (Şekil 2.9A-D). Düşey ve eğimli kıvrım eksenlerine sahip dönmüş ve yatık kıvrımlar çeşitli yönlenmeler gösterir. Kıvrım boyutları alttaki yumuşak sediment deformasyon yapıları boyutundan küçüktür ve nadir olarak 5 cm'yi geçer ve genellikle 1 cm'den azdır (Mastrogiacomio vd., 2012).

Deformasyon seviyesinin tabanı mm ölçeğinde asimetrik kıvrımlar içerir ve bu kıvrımlarda büyük ölçekli kıvrımlar tarafından üzerlenir. Lokal olarak tabandaki kıvrımların aksiyal yüzey dalım yönleri üzerleyen kıvrımların yönlerine göre ters yöndedir (Şekil 2.9D). Tabaka kalınlığı kıvrımların eklem zonlarında artar, kanatları boyunca azalır. Ayrılma yüzeyleri nadirdir ve breşleşme yoktur. Üst yüzeyleri yüzeyleyenlerden ölçülen eklem hatları düzenli olarak 155° yönündedir. Geriye doğru bindirme özelliği üst deforme olmuş B seviyesinde A seviyesine göre daha baskındır. Bununla beraber bu eğimler GB-KD kısalma yönü ile uyumludur ve GB'ya doğru taşınmaya eğilimlidir (Mastrogiacomio vd., 2012).



**Şekil 2.9.** Üst kıvrım yaygısı (SSB) A ve B) Üst ve ince deforme olmuş seviyede kıvrımların üç boyutlu görünümü. C) Yarı yatık kıvrım eksenine sahip kayma-oturma kıvrımları. D) Zıt yönde eğimli farklı seviyelerde gözlenen kayma-oturma kıvrımları (Mastrogiacomio vd., 2012).

Koç-Taşgın ve Altun (2019)'un yaptığı çalışmada düşük eğimli yamaç fasiyesleri içerisinde 6 lokasyonda kayma-oturma yapıları tanımlanmıştır. Bu yapılar yaklaşık 5 km kadar devamlılık göstermektedir. Kayma-oturma yapılarından elde edilen veriler kayma hareketinin genellikle güney-güney doğuya doğru geliştiğini göstermektedir. Bu hareket yönü denizin derinleşme yönüne uyumluluk göstermektedir. Bölgede havzayı etkileyen tektonizmaya bağlı sismik aktiviteler yumuşak çökel deformasyon yapılarının oluşumunda önemli tetikleyici mekanizmayı oluşturmuştur. Verilerin değerlendirilmesi sonucu bölgede en az 6 veya daha büyük sismik aktivitelerin oluşmuş olabileceği belirlenmiştir.



**Şekil 2.10.** Düşük eğimli yamaç fasiyesleri içerisinde gelişmiş kayma-oturma yapıları (Koç-Taşgın ve Altun, 2019)

### 2.3.1. Deformasyon Mekanizması

Her iki deforme olmuş seviye tipik kayma-oturma yaygıları olarak karakterize edilebilir. Kayma-oturma yapıları yamaçtaki hareketle graviteye bağlı gerilmenin yanal bileşeni tarafından itilir (Owen, 1987). Bununla birlikte paleoyamaç göstergesi olarak asimetrik kıvrımların yönlenmesi ve ayrılma yüzeyleri yaygın değildir. Porto Selveggio'da iki kıvrım yaygisından alınan veriler aksiyal düzlemlerin ve ayrılma yüzeylerinin tabakalanmaya paralel makaslama gerilmesi ile ilişkili olduğunu gösterir (Mastrogiacomo vd., 2012).

Benzer fasiyeslere sahip deforme olmamış tabakalar tarafından iki deforme olmuş seviyenin ayrılması ve iki seviye arasındaki deformasyon geometrisi zıtlığı deformasyonun iki ayrı olay olarak oluştuğunu gösterir. İki kıvrım yaygisında zıt deformasyon sitili iki seviye arasındaki davranışta önemli bir fark ifade eder. Alttaki deforme olmuş seviye yani daha kalın kayma-oturma yaygısı (A) hem gevrek (taban breşleşmesi, ayrılma yüzeyleri) hem de sünümlü deformasyon

(çeşitli şekillerde, ölçekte ve yönde kıvrımlar) ile karakterize edilir. Üstteki daha ince kıvrım yaygısı (B) sadece sünümlü deformasyon (temel breşleşme yok, esas olarak küçük kıvrımlar) gösterir. Aradaki bu fark iki kayma-oturma yaygısındaki baskın fasiyes çeşitliliğinden kaynaklanabilir. Fasiyes 1 in daha kalın homojen tabakaları makaslama gerilmesine maruz kaldığı zaman kırılır. Halbuki fasiyes 2'nin laminalı çamurtaşları tekil laminalar boyunca küçük yer değiştirmeler ile aynı toplam gerilmeye maruz kalmıştır (Mastrogiacomo vd., 2012).

Buradaki kayma-oturma yaygılarının oluşumu allojenik tetikleme mekanizması ile başlatılır. Buna göre; Geç Kretase esnasında Apulian Platformu tektonik olarak aktiftir. Eklem ve Kanat zonları arasındaki materyallerin taşınmıştır. Kayma-oturma yaygılarının altında, üstünde ve arasında deforme olmamış tabakalar yer almaktadır. Bu durum deformasyonun sıkışmamış sedimentlerde, istif çökelerken tekrarlamalı bir şekilde hareket eden tektonik aktivitelerle (sedimentlerde sismik olarak oluşan zayıflama ve/veya deniz altı yamaçlarının tektonik olarak dikleşmesi) ilişkili bir mekanizma ile oluştuğunu gösterir. Güncel ve eski çökelerde çok düşük açılı yamaçlara sahip ortamlarda sismik hareketlerle oluşmuş kayma-oturma yapıları tanımlanmıştır (Field vd., 1982; Gibert vd., 2005; Moretti ve Sabato, 2007; Spalluto vd., 2007; Alsop ve Marco, 2011; Garcia-Toryosa vd., 2011). Su-sediment ara yüzeyindeki düzensizliklerle ilişkili küçük kayma ve oturmalara benzer özellikler laboratuvar şartlarında sınırlanmayla ilişkili olarak üretilmiştir(Mastrogiacomo vd., 2012).

### **2.3.2. Tetikleme Mekanizması: Tektonik ve sismik hareketler**

Bu örnek Üst Kretase yaşlı Porto Selvaggio bölgesi karbonat istifinde (Apulian Karbonat Platformu) gözlenen kayma-oturma yaygılarıdır.

Bu bölgedeki fasiyes değişimi platform üzerinde yeni bir havzanın hızlı oluşum fazını yansıtır ve karbonat oluşumunun ani bir şekilde tekrar düzenlenmesini ifade eder. Özellikle fasiyes özellikleri Geç Kampaniyen esnasında karbonat sedimentasyonunun düşük eğimli ramp ortamı boyunca bir platform içi havzada oluştuğunu gösterir. Laminaların varlığı, ince taneli sedimentlerin baskınlığı düşük biyolojik çeşitlilik, sınırlı tabana yapışık fauna, balık fosillerinin korunması ve koyu renk geniş bir alanda zayıf dip akıntıları ile etkilenmiş sınırlı oksijensiz ortamda çökelmeyi yansıtır.

### **2.4. Türbiditik Çökelerde Tanımlanan Yastık Yapıları**

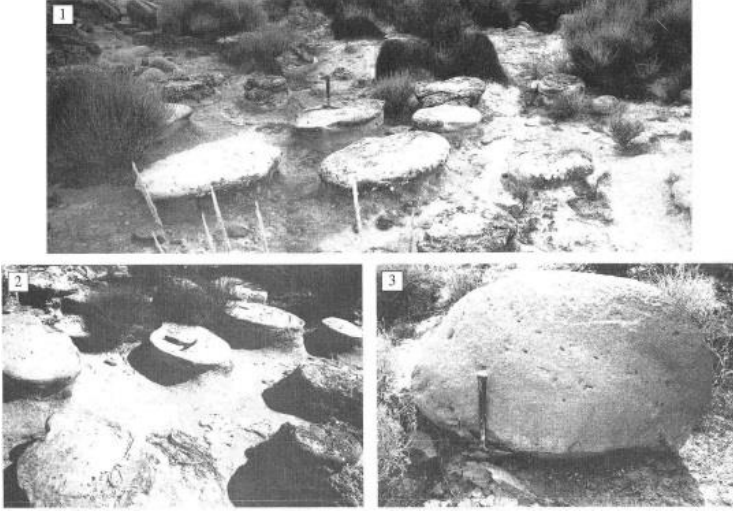
Yumuşak sediment deformasyon yapıları yamaç depolanma sisteminin merkezi kısmında yedi tabakada yüzeylenmiştir. Bu yapılar ince taneli kumlar içerisinde iri taneli kumlar ile karakterize edilir. Uzunlukları 0,2-2 m, yükseklikleri 0,3-1,5 m arasında değişir. Yastık yapılarının boyutlarının tane boyu ile ilişkili olduğu

görülür. Özellikle büyük yastık yapılarının ince kum içerisinde çok kaba kum ile oluşan bir sistemi karakterize ettiği görülür. Yastıkları çevreleyen sedimentler esas olarak birincil laminasyonu eksik olan ve karışık-deforme olmuş ince ve siltli kumdan oluşur. Çevreleyen sedimentlerde tane boyu farklılığının varlığı ve yastık yapılarının sedimanter özelliklerinin devamlılığının eksikliği bu yapıların konsantrik kökenli nodüller olabileceği ihtimalini çürütür (Moretti vd., 2001).

Yüzeylemeler, incelenen yapıların üç boyutlu morfolojisini görmeye müsaade eder. Plan görünüşte yastık yapıları elips şekillidir. En uzun ve en kısa çap arasında yaklaşık değişmez bir oran vardır. Ayrıca, yastıkların en uzun çapları aynı yönde dizilmişlerdir. Yastık yapıları düşey kesitte (en uzun çapa paralel) asimetri gösterir (Şekil 2.10). Düzenli yastık yapıları az oranda olup asimetrik yastık yapıları ile ilişkilidir.

Literatürlerde tanımlanan yastık yapıları konsantrik deformasyon gösterir veya homojen dokuya sahiptir. Bu havzada tanımlanan yastık yapıları bazı alışılmadık özellikler gösterir. Büyük ölçekli yastık yapıları tabanda kil parçaları içeren iri taneli çökeller üstte doğru ince-orta taneli kumlara geçiş gösterirler (Şekil 2.10-1, 2). En uzun eksene paralel kesitte büyük boyutlu yastık yapıları normal dereceli bir asimetrik zonlanma gösterir. Farklı tane boyuna sahip seviyeler hafifçe deforme olmuş ve genellikle yastık yapılarının kenar kısımlarının eğim yönlerine kıyasla zıt yönde eğilmişlerdir (GB). Kısa eksene paralel düşey kesitte normal derecelenme mükemmel bir şekilde simetriktir. Bir dereceye kadar, küçük yastık yapıları üstte paralel laminalı ince taneli kumlu mesafe ve iç lamina deformasyonu, yastık yapılarının sınırları boyunca gözlenir. Ayrıca sabit düzlemsel uzamaya sahip yük kalıpları ile bağlantılı, alışılmadık uzamış tabakalar (K240) oluşur (Şekil 2.11-1). Bu yapılar sık sık çok ince taneli siltli kumlar içerisinde korunmuş ve maksimum uzunluğu 2 m'ye ulaşan 3-4 bağlantılı yük kalıplarından oluşur (Şekil 2.11-2). Setleri oluşturan tekil yük kalıpları arasında kalmış ince kumlardan oluşan sınırlı zon düşey su kaçma morfolojisi gösterir. Lokal olarak bu düşey su kaçma morfolojisi daha belirgindir ve su kaçma zonu düzensiz olarak bitişik yastık yapılarını keserler (Şekil 2.11-3) (Moretti vd., 2001).





**Şekil 2.11.** Guadix Havzası'nda (İspanya) tanımlanan yumuşak sediment deformasyon yapılarının morfolojik özellikleri. 1.Yastık yapılarının düzlemsel görünüşü elips şeklinde ve  $K240^\circ$  yönlenmiştir. 2. Plan görünüşte yastık yapılarının uzamış morfolojisinin detaylı görünümü. 3. Büyük yastık yapılarının asimetrik özellikleri (en uzun çapa paralel). 3 boyutlu şeklini ve enine kesitte dokusal özelliklerini görmek için kaldırıp döndürülmüş hali (Moretti vd., 2001).



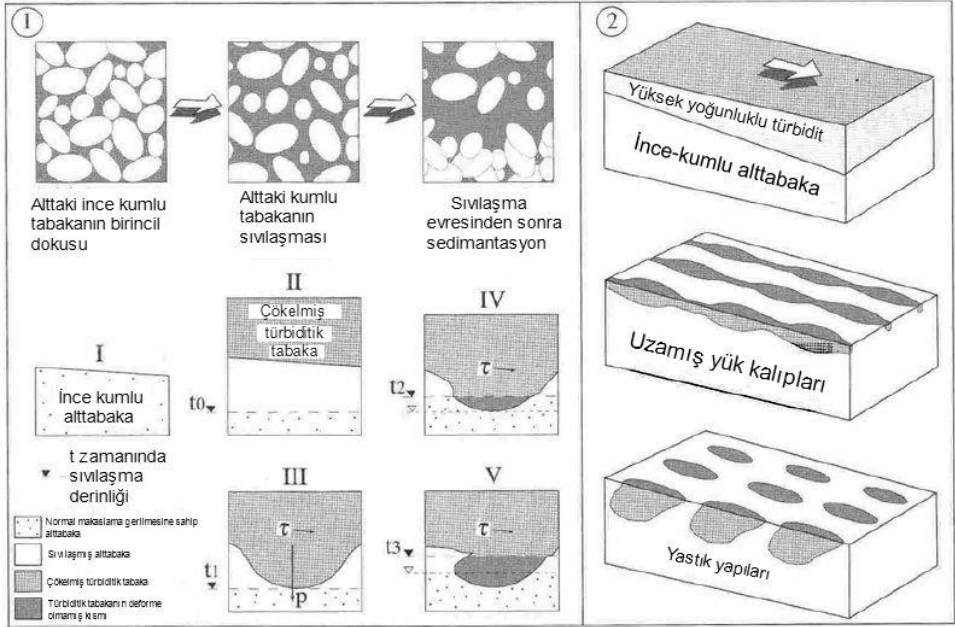
**Şekil 2.12.** Uzamış yük kalıplarının morfolojik özellikleri (Guadix Havzası, İspanya). 1.Yük kalıplarının yanal görünümü. Bitişik yük kalıpları arasında düşey yönde su kaçma yapısı. 2.  $K240^\circ$  yönünde uzamış yük kalıpları setinin önden görünümü. 3. Bitişik yastık yapıları arasında düzensiz su kaçma zonu. Alttaki ince taneli kumlarda gözlenen laminasyon yukarıya doğru kıvrılmıştır (Moretti vd., 2001).

### 2.4.1. Deformasyon mekanizması

Bu yapıların oluşumunda muhtemel itme kuvveti; yamaç eğimidir. Bu yorum türbiditik fasiyeslerde ölçülen eski akıntı yönlerini temel almıştır (ana değerler yaklaşık  $K250^{\circ}$ - $260^{\circ}$ ). Eski akıntı yönlerinde nispeten büyük bir dağılım vardır (Ana değer yaklaşık  $K250^{\circ}$ - $260^{\circ}$ ). Aksine yumuşak sediment deformasyon yapıları plan görünüşte ( $K240^{\circ}$ ) sürekli bir uzama modeli ve düşey kesitte asimetrik özellik sergiler. Ayrıca bu bölgeye yakın Alicun de Ortega'da tanımlanan yumuşak sediment deformasyon yapıları türbidit çökellerinin deformasyonu sırasında ve sonrasında devamlı bir büyüklüğe sahip hareketlerin oluşturduğu deformasyon ile uyumludur. Şekil 2.12'de yumuşak sediment deformasyon yapılarının son morfolojik özellikleri gözlemlendiği duruma göre deformasyon evrelerinin yorumu verilmiştir. Birinci evrede (Şekil 2.12'de I) düşük yoğunluklu türbiditik akıntılarla (veya yüksek yoğunluklu türbiditik akıntıların distal çökeli) ilişkili ince taneli kumlu veya siltli kumdan oluşan alttaki tabakanın varlığı ile temsil edilir (Moretti vd., 2001).

Yüksek yoğunluklu türbiditik sedimentasyon alttaki ince kumlu tabakada makaslama dayanımının şiddetli bir şekilde azalmasına neden olur (Şekil 2.12'de II). Makaslama kaybı, iki itme gücü sisteminin varlığına göre deformasyona müsaade eder (duraysız yoğunluk eğimi ve yanal makaslama gerilmesi). Muhtemelen deformasyonun birinci evresinde duraysız yoğunluk aşaması en önemli itici güç sistemidir: Yüksek yoğunluklu türbiditlerin ilk dönemleri alttaki ince taneli kumlarla kıyaslandığında büyük bir hacim yoğunluğuna sahip iri taneli kumlarla temsil edilir. Eğer alttaki ince kumlu tabaka tam bir sıvılaşmaya uğrarsa bu duraysız yoğunluk aşaması daha büyük olur. Bu nedenle türbiditlerin sedimentasyonu esnasında ve hemen sonrasında kaba-orta taneli ve alttaki ince taneli kumlar arasındaki yüzey gravitasyonel duraysızlığın en büyük olduğu yerdir. Yastık yapılarının ve yük kalıbı setlerinin birincil morfolojisi alt kinematik viskozitenin üst dönemi (Anketel ve diğ., 1970) basit duraysız yoğunluk sistemi ile uyumlu olabilir. Basit duraysız yoğunluk sistemi ile başlatılan deformasyon temel olarak kısmi gravitasyonel yeniden düzenlemeyi ifade eder. Kısmi gravitasyonel yeniden düzenleme evresi, tane sisteminin dereceli düzenlemesi başlamadan önce tamamlanır (t1 ve t2 arasında, Şekil 2.12-1) Bu işlev sıvılaşmış haldeki sedimentasyonla ilişkilidir. Deformasyon evreleri: - Deformasyonun ilk evresinde iki itici güç sisteminin hareketi (duraysız yoğunluk sistemi ve yanal makaslama gerilmesi), - Sıvılaşma tabanının yükselmesi, - Yanal makaslama gerilmesi hareketinin sürekliliğidir (Moretti vd., 2001).

Yastık yapıları ve yük kalıplarının üstten görünüşteki uzun şekli muhtemelen yük yapılarının yamaç aşağı doğru dizilmesini oluşturan yanal makaslama gerilmesinin sürekli devam ettiğini gösterir.



**Şekil 2.13.** Tahmin edilen deformasyon mekanizması ve deformasyon evreleri. 1. Altta ince kumlu tabakaların sıvılaşması ile oluşan türbiditik tabakaların hızlı sedimantasyonu (I ve II). Deformasyonun 1. Evresi (III); graviteye bağlı duraysızlık ( $p$ ) etkisi hakimdir. Tane kontaklarının tekrar düzenlenmesinin başlangıcından sonra (sıvılaşmış evreden sedimantasyonla ilişkili) esas itici kuvvet yanal makaslama gerilmesi olarak tanımlanır ( $t$ -IV). Bu sırada yanal makaslama gerilmesi, daha az kalınlıktaki sedimenti harekete geçirir. Bu işlev enine kesitte asimetriye sebep olur. 2. Yastık yapıları ve yük kalıbı setlerinin 3 boyutlu oluşum şekli (Moretti vd., 2001).

#### 2.4.2. Tetikleme Mekanizması: Hızlı Sedimantasyon

Bu örnek Güney İspanya'nın Guadix Havzası'nda türbiditik çökellerde gözlenen yumuşak sediment deformasyon yapılarıdır. Çalışma alanı Guadix havzasının (Güney İspanya) kuzey kenarında mostra verir. Yumuşak sediment deformasyon yapılarının gözlemlendiği çökeller Guadix havzasının en genç çökelleridir. Bu istif üç fasiyes topluluğundan oluşur ve bunlar üç farklı depolanma sistemini yansıtır: Şelf, yamaç ve pelajik ortam.

Tanımlanan deformasyon yapıları yamaç depolanma sisteminde gelişmiştir. Kalın kumlu ve şeylli tabakaların ardalanmasından oluşan istifte kumlu tabakalar türbiditik fasiyeslerden oluşur. Ölçülen eski akıntı yönleri yamaç yönüyle uyumluluk gösterir.

## SONUÇLAR

Denizel ortamlarda tanımlanan yumuşak sediment deformasyon yapıları incelenmiş ve özellikleri belirlenmiştir. Bunun dışında aşağıdaki önemli ayırım belirlenmiştir.

-Depremlerle oluşan tsunami dalgaları fırtına dalgalarından çok daha güçlü olarak bilinen dalgalardır ve büyük oygu yapıları oluştururlar.

-Silisiklastik tabakalardaki yumuşak sediment deformasyon yapıları karbonat fasiyeslerindeki yumuşak sediment deformasyon yapılarından farklıdır. Karbonat kayaçlar daha erken diyajenez geçirdiği için bunlarda gözlenen yumuşak sediment deformasyon yapısı çeşidi azdır.

-Erken denizel çimentolanma, erken diyajenez sırasında kırıntılı sedimentlerde genellikle minimal düzeydedir. Kırıntılı sedimentlerde oluşan yumuşak sediment deformasyon yapılarının tepe kısımlarının kesik olması deformasyonun su-sediment ara yüzeyinde veya yüzeyin birkaç santimetre-desimetre altında olduğunu gösterir. Karbonat kayaçlarda gözlenen yumuşak sediment deformasyon yapılarının tepe kısımları kesik değildir. Karbonat kayaçlar deniz tabanında erozyon ile yüzeylenmez ve üzerleyen tabakanın çökmesinden sonra oluşur.

-Asimetrik kıvrımların yönlenmesi ve ayrılma yüzeyleri paleoyamaç göstergesidir.

-Fasiyes farklılıkları farklı tip yumuşak sediment deformasyon yapılarının oluşumuna neden olabilir.

## KAYNAKLAR

- Chen, J. ve Lee, H.S., 2013. Soft-Sediment deformation structures in Cambrian Siliciclastic and carbonate storm deposits (Shandong Province, China): Differential liquefaction and fluidization triggered by storm-wave loading. *Sedimentary Geology*, 288, 81-94.
- Koç Taşgın,C., Altun, F., 2019. Denizel Ortamlarda Oluşan Yumuşak Çökel Deformasyon Yapılarına Bir Örnek; Kayma-Oturma Yapıları, Kırkgeçit Formasyonu, KB Baskil, Elazığ. F.Ü. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31 (1), 145-156.
- Mastrogiacomo, G., Moretti, M., Owen G., Spalluto., 2012. Tectonic triggering of slump sheets in the Upper Cretaceous carbonate succession of the Porto Selvaggio area(Salento Peninsula, southern Italy): Synsedimentary tectonics in the APULIAN Carbonate Platform. *Sedimentary Geology*, 269-270, 15-27.
- Moretti, M., Bari., Soria, J.M. and Alfaro P., Walfs A. Ve N., 2001. Asymmetrical Soft-Sediment Deformation Structures Triggered by Rapid Sedimentation in Turbiditic Deposits (Late Miocene, Guadix Basin), Southern Spain. *Facies*, PI 46-47, 283-294.
- Nichols, F., 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*, Wiley-Blackwell, 419s.
- Rossetti, D.F., Goes, A.M., Truckenbrodt, W. ve Anaisse, J., 2000. Tsunami-induced large-scale scour-and-fill structures in Late Albian to Cenomanian deposits of the Grajau Basin, Northern Brazil. *Sedimentology*, 47, 309-323.

## **4. Bölüm**

### **Bor ve Türevlerinin Asfalt Kaplamalarda Kullanılmasının Araştırılması**

**Ersoy KABADAYI<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör., Giresun Üniversitesi Keşap Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü, [ersoy.kabadayi@giresun.edu.tr](mailto:ersoy.kabadayi@giresun.edu.tr),  
ORCID: 0000-0003-4062-3117

## ÖZET

Bu çalışmada, bor ve türevlerinin asfalt kaplamalarda kullanımının etkileri incelenmiştir. Asfalt kaplamalarının özellikle aşırı sıcaklık ve çevresel etmenlere karşı duyarlılıkları sebebiyle, asfaltın performansını iyileştirmek amacıyla kullanılan yöntemler araştırılmıştır. Bor ve türevleri, asfaltın mekanik özelliklerini iyileştirmek ve sürdürülebilirlik sağlamak amacıyla umut vaat eden katkı maddeleri olarak öne çıkmaktadır. Çalışmalar, borun asfaltın dayanıklılığını ve işlenebilirliğini artırarak tekerlek izi direncini ve yorulma dayanımını geliştirdiğini göstermektedir.

Çalışma kapsamında, özellikle bor atıkları olan Kırılmış Bor Atığı (CBW), Boraks Pentahidrat (BP) ve Susuz Boraks (BA) gibi katkı maddeleri kullanılarak asfalt kaplamaların performansı araştırılmıştır. Sonuçlar, bu maddelerin asfaltın sıcaklık dayanımını artırarak deformasyon ve çatlama gibi sorunları azalttığını göstermiştir. Ek olarak, bor oksit ve balmumu kombinasyonları ile modifiye edilmiş asfaltlarda hem işlenebilirlik hem de sıcaklık performansı önemli ölçüde iyileşmiştir.

Araştırmada ayrıca, nano boyutlu magnezyum spinel oksit ve kolemanit katkılarının sıcak iklimlerde kullanılan asfaltlar üzerindeki olumlu etkileri de vurgulanmıştır. Bor bileşikleri ile yapılan modifikasyonlar, asfaltın yaşlanma direncini ve düşük sıcaklık çatlama direncini artırarak uzun ömürlü, dayanıklı ve çevre dostu asfalt kaplamaları elde edilmesini sağlamaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Asfalt, Bor, Bitüm, Sürdürülebilir yol kaplamaları, Kırılmış Bor Atığı (CBW), Asfalt performansı

## 1. GİRİŞ

Asfalt kaplamalar, modern karayolu inşaatlarının temel bileşenlerinden biridir ve dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Asfalt, bağlayıcı olarak bitüm ve çeşitli agregaların karışımıyla elde edilen bir malzemedir. Bu malzeme, yol yüzeyinde düzgün bir sürüş sağlamak ve aynı zamanda ağır trafik yüklerine ve çevresel etkilere karşı dayanıklılık göstermek amacıyla kullanılır. Ancak, asfalt kaplamaların uzun ömürlü olabilmesi için, trafik yoğunluğu, sıcaklık değişiklikleri ve diğer çevresel etmenler gibi faktörlere karşı dayanıklılıklarının artırılması gerekmektedir. Geleneksel asfalt kaplamaları, zamanla deformasyon, tekerlek izi oluşumu ve çatlama gibi sorunlara maruz kalabilir. Bu yüzden, araştırmalar asfaltın performansını ve dayanıklılığını artırmak için farklı katkı maddelerinin kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır (Keskin & Karacasu, 2019a).

Asfalt kaplamalarının performansını artırmak amacıyla farklı malzemelerin ve katkı maddelerinin asfalt karışımına eklenmesi, son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu araştırmalarda amaç, asfaltın hem mekanik özelliklerini hem de uzun ömürlülüğünü iyileştirmektir. Geleneksel asfalt karışımları, aşırı sıcak veya soğuk hava koşullarında deformasyona ve çatlamaya eğilimli olabilir. Ayrıca, asfaltın işlenebilirliği ve üretim sürecinde enerji tüketimi gibi faktörler de asfaltın genel maliyetini ve çevresel etkilerini etkileyebilir. Bu bağlamda, bor ve türevleri gibi alternatif malzemeler, asfaltın hem performansını artırmada hem de çevresel sürdürülebilirliği sağlamada büyük bir potansiyel sunmaktadır (Yeşilçiçek vd., 2022).

Bor, periyodik cetvelde bulunan ve Türkiye'nin sahip olduğu geniş rezervlerle bilinen bir elementtir. Borun bu kadar yaygın kullanımı, Türkiye'nin stratejik kaynaklarını değerlendirme açısından büyük bir fırsat sunmaktadır. Bor elementinin farklı endüstrilerdeki kullanım alanları, asfalt kaplamalarda da performans artırıcı bir bileşen olarak öne çıkmıştır.

Bor ve türevlerinin asfalt kaplamalarda kullanılmasının araştırılması, son yıllarda hem akademik çevrelerde hem de inşaat sektöründe büyük ilgi görmektedir. Geleneksel asfalt malzemelerinin performans ve dayanıklılık açısından bazı sınırlamaları olduğu bilinen bir gerçektir. Özellikle sıcak iklimlerde, asfalt kaplamalar zamanla deformasyona uğrayarak hem sürüş konforunu hem de yol güvenliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bunun yanı sıra, asfalt üretimi sırasında yüksek enerji tüketimi ve çevreye zararlı emisyonların salınması gibi çevresel kaygılar da artmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, son yıllarda daha dayanıklı, uzun ömürlü ve çevre dostu asfalt kaplama malzemeleri geliştirme çabaları yoğunlaşmıştır. Bu çabaların bir parçası olarak, bor ve türevleri gibi alternatif malzemelerin asfalt kaplamalarda kullanımı üzerine yapılan araştırmalar büyük bir hız kazanmıştır.



## **2. ASFALT KAPLAMALAR**

Asfalt kaplamaların performansını artırmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, asfaltın dayanıklılığını, sıcaklık dayanımını ve uzun ömürlü olmasını hedeflemektedir. Modern araştırmalar, çeşitli katkı maddeleri ve modifikasyon yöntemleri kullanarak asfaltın mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

### **2.1. Polimer Modifikasyonları**

Asfalt kaplamalarının performansını artırmanın en yaygın yollarından biri, polimer modifikasyonları kullanmaktır. Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) gibi polimerler, asfaltın elastikiyetini ve sıcaklık dayanımını artırarak tekerlek izi (rutting) oluşumunu azaltır. Örneğin, SBS ve Polyphosphoric Acid (PPA) kombinasyonunun, asfaltın yüksek sıcaklık dayanımını ve yaşlanmaya karşı direncini önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur. Özellikle %4 SBS ve %1.5 PPA oranları asfaltın yüksek sıcaklık performansında belirgin iyileşmeler sağlar (Wu, 2014).

### **2.2. Doğal Asfalt ve Nano Malzemeler**

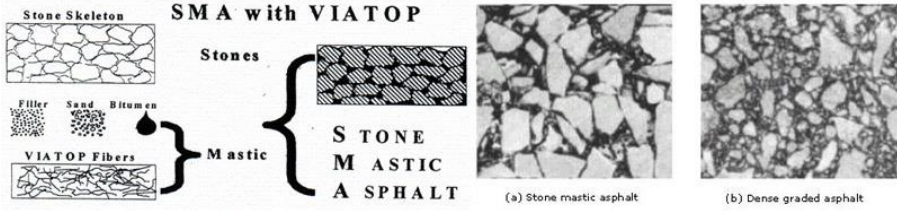
Bir diğer yaygın yöntem ise doğal asfalt ve nano malzemelerle modifikasyondur. Doğal asfaltlar, modifiye asfalt karışımlarında kullanıldığında asfaltın yüksek sıcaklıklardaki stabilitesini artırmakta ve su hasarına karşı dayanıklılığı geliştirmektedir. Aynı zamanda, nano boyuttaki malzemeler de asfalt bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılarak asfaltın performansını artırır. Bu malzemeler, asfalt karışımının etkinliğini artırarak yol kaplamalarının dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü sağlar (Fan vd., 2011).

### **2.3. Lif Katkıları**

Asfalt karışımlarında lif katkıları kullanmak, asfaltın mekanik özelliklerini iyileştirmenin etkili yollarından biridir. Özellikle polipropilen lifler, asfaltın çatlama direncini ve yıpranmaya karşı dayanıklılığını artırarak daha uzun ömürlü bir kaplama sağlar. Lif oranlarının optimize edilmesiyle asfaltın performansında önemli gelişmeler gözlemlenmiştir. Örneğin, Yüksek Yoğunluklu Polipropilen (HDPP) liflerin %0.5 oranında kullanılması, asfalt kaplamalarının laboratuvar ve saha testlerinde daha yüksek performans gösterdiği tespit edilmiştir (Fan vd., 2011).

## 2.4. Modifiye Asfalt Karışımları

Yüksek performanslı asfalt karışımları geliştirmek için taş mastik asfalt (SMA) gibi özel karışımlar da kullanılmaktadır. Bu karışımlar, asfaltın drenaj yeteneğini artırarak yüzeyde su birikimini azaltmakta ve kayma direncini artırmaktadır. Bu karışımlar özellikle yoğun trafiğe maruz kalan yollar için tercih edilmektedir (Li & Huang, t.y.).



Şekil 1. Taş mastik asfalt karışımlar

## 2.5. Yaşlanma Karşıtı Katkılar ve Modifiye Ajanlar

Asfaltın yaşlanma sürecini yavaşlatmak için kullanılan bir diğer yöntem ise yaşlanma karşıtı katkı maddeleridir. Bu katkılar, asfaltın sertleşmesini geciktirir ve karışımın viskozitesini düzenler. Özellikle asfalt bağlayıcılarına eklenen antioksidanlar ve modifiye ajanlar, asfaltın sıcaklık duyarlılığını azaltarak uzun ömürlü olmasını sağlar (Yunquan vd., 2010).

Sonuç olarak, asfalt kaplamaların performansını artırmak için kullanılan yöntemler, modern yolların daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Polimer modifikasyonları, doğal asfalt ve nano malzemeler, lif katkıları, özel karışımlar ve yaşlanma karşıtı katkı maddeleri, asfaltın performansını artırmada etkili yöntemlerdir. Bu yöntemler, asfaltın yüksek sıcaklıklara dayanıklılığını, çatlama ve yıpranmaya karşı direncini artırarak sürdürülebilir ve güvenli yol kaplamaları oluşturur.

## 3. BOR VE TÜREVLERİ

Bor ve türevleri, benzersiz kimyasal özellikleri nedeniyle çeşitli endüstriyel sektörlerde önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek ısı direnci, kimyasal stabilitesi ve güçlü kovalent bağlar oluşturma yeteneği ile öne çıkan bor, özellikle cam, seramik ve polimer üretiminde yaygın olarak kullanılan bir elementtir. Endüstride en yaygın kullanılan bor bileşenlerinden biri borik asit ve buna bağlı boratlardır. Boratlar, özellikle boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) ve kolemanit ( $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), cam üretiminde erime sıcaklığını düşürmede ve seramiklerin fiziksel özelliklerini iyileştirmede önemli rol oynarlar (Schubert, 2019).



**Şekil 2.** Boraks



**Şekil 3.** Kolemanit

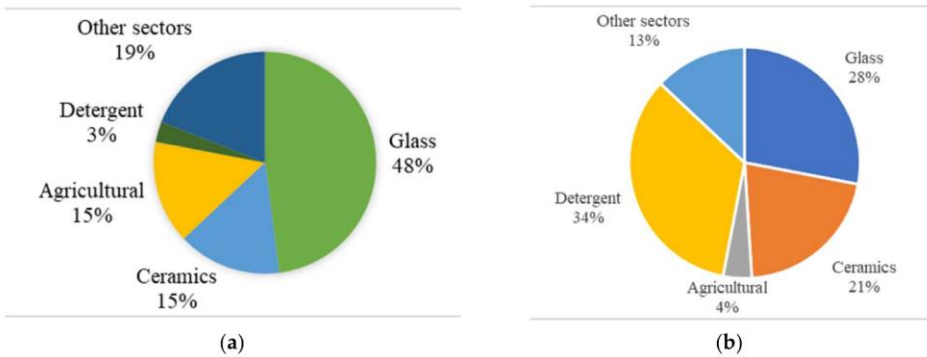
Bor bileşikleri, geleneksel sektörlerin yanı sıra, modern malzeme biliminde de kritik bir öneme sahiptir. Özellikle bor karbür ve bor nitrür gibi ileri düzey malzemelerin üretiminde kullanılırlar. Bu malzemeler, hafif, aşırı sert ve mekanik olarak benzersiz özelliklere sahip olduklarından, yüksek performanslı cihazlarda, koruyucu kaplamalarda ve hatta zırh malzemelerinde kullanılmaktadır. Bor karbür, aşınmaya ve korozyona karşı yüksek direnci ile bilinmekte olup, endüstriyel ortamlarda zorlu koşullarda kullanılmaktadır (He & Zhong, 2013).

Ayrıca bor, yarı iletken endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Elektronik özellikleri, borun dopaj işlemlerinde kullanılmasını sağlar, bu da silikona iletkenlik kazandırarak elektronik cihazların üretiminde kritik bir rol oynar. Bor ayrıca katalizör olarak organik sentezlerde kullanılan güçlü

bir elementtir. Lewis asitliği, boru farmasötik ve ince kimya üretiminde reaksiyonları kolaylaştıran önemli bir bileşen yapar (Truong vd., 2014)

Borun endüstriyel alandaki önemli enerji teknolojilerinde de görölmektedir. Magnezyum-bor süper iletkenleri gibi bor bileşikleri, yüksek performanslı süper iletken malzemelerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu malzemeler, enerji iletiminde ve manyetik uygulamalarda sıfır elektriksel direnç ve düşük sıcaklıklarda güçlü manyetik alanlar üretme yetenekleri sayesinde önemli avantajlar sunar.

Türkiye, dünya bor pazarında özellikle önemli bir konuma sahiptir. Dünya bor rezervlerinin yaklaşık %70'ine sahip olan Türkiye, batı Anadolu'daki yataklardan çıkarılan boraks ve kolemanit gibi mineralleri ile bor ürünlerinin önde gelen ihracatçılarından biridir. Bu sektördeki ekonomik önem, başta Avrupa olmak üzere çeşitli pazarların bor türevlerine artan talebiyle birlikte giderek artmaktadır (Elevli vd., 2022)



Şekil 4. (a) Dünyada bor kullanımı ve (b) Türkiye'de bor kullanımı

Sonuç olarak, bor ve türevleri, geleneksel cam ve seramik üretiminden ileri teknolojilere kadar geniş bir yelpazede endüstriyel uygulamalar için vazgeçilmezdir. Bor kimyasının çok yönlülüğü ve özellikle Türkiye gibi rezerv bakımından zengin ölkelerde bol miktarda bulunması, borun hem günümüz hem de gelecekteki sanayi yeniliklerinde kritik bir rol oynamaya devam edeceğini göstermektedir.

#### 4. YAPILAN ÇALIşMALAR

Bor ve bor içeren bileşiklerin asfalt performansını artırmak amacıyla kullanımına yönelik yapılan çalışmalar, asfaltın hem mekanik özelliklerini hem de çevresel sürdürülebilirliğini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Bor, Türkiye gibi büyük rezervlere sahip ölkelerde atık bir ürün olarak önemli

miktarlarda birikmekte ve çevre sorunlarına yol açmaktadır. Bu atıkların geri dönüşümü ve inşaat malzemelerinde kullanımı, hem çevreye hem de ekonomiye katkı sağlayacak sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Bor ve asfalt ilişkisini ele alan çalışmalar, borun farklı formlarının ve katkı maddelerinin asfaltın performansına olan etkilerini geniş kapsamlı şekilde incelemiştir.

Bor atıklarının asfalt betonu üretiminde kullanılması üzerine yapılan çalışmalarda, sürdürülebilirliğe vurgu yapılmaktadır. Yapılan araştırmada, üç farklı bor katkı maddesi olan Kırılmış Bor Atığı (CBW), Boraks Pentahidrat (BP) ve Susuz Boraks (BA) asfalt betonu üretiminde kullanılmıştır. Bu testler sonucunda, bu üç malzemenin spesifikasyonlara uygun olduğu ve CBW'nin uzun ömürlü performans, maliyet ve çevresel açıdan en uygun seçenek olduğu belirlenmiştir. Çalışmada CBW'nin, yol yapımında kullanılarak yıllık binlerce ton bor atığının geri dönüştürülebileceği vurgulanmıştır. Bu çalışma, bor atıklarının geri dönüştürülerek çevre kirliliğinin azaltılması ve sürdürülebilir bir yaşam sağlanması açısından büyük bir potansiyel sunduğunu göstermektedir (Keskin & Karacasu, 2019).

Bor ve nano boyutlu magnezyum spinel oksit kullanılarak yapılan modifikasyonlar, asfaltın performansını özellikle yüksek sıcaklıklarda artırma yönünde önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Yapılan bir çalışmada, nano boyuttaki magnezyum spinel oksit ve kolemanit ile modifiye edilmiş bitümün tekerlek izi direncinde ve yorulma dayanımında belirgin bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, %8 oranında nano magnezyum spinel oksit eklenmesiyle, normal bitüme kıyasla yaklaşık 4°C'lik bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapılan yorulma testlerinde, modifiye edilmiş numunelerde yorulma direnç parametresinin %60 oranında arttığı belirtilmiştir. Çalışma, özellikle sıcak iklim bölgelerinde kullanılan asfaltlarda bu tür nano katkı maddelerinin faydalı olabileceğini göstermektedir (Öcal vd., 2018)

Asfaltın işlenebilirliği ve yüksek sıcaklık performansını iyileştirmek amacıyla bor oksit ve balmumu katkıları kullanılarak yapılan çalışmalarda, bu iki maddenin birlikte kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar dikkat çekicidir. Bir çalışmada, bor oksit ile balmumu kombinasyonunun hem işlenebilirliği artırdığı hem de yüksek sıcaklık dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Özellikle bor oksit, asfaltın yüksek sıcaklık performansını artırırken viskozitesini de artırmaktadır; ancak işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Balmumu ise, bu olumsuzluğu gidermek için kullanılmış ve bor oksidin işlenebilirlik üzerindeki olumsuz etkilerini dengelemiştir.

Sonuç olarak, bu iki katkı maddesinin kombinasyonu ile asfaltın hem yüksek sıcaklıklarda dayanıklı hem de işlenebilirliği yüksek bir yapı kazandığı vurgulanmaktadır (Şahan vd., 2024)

Bir başka önemli çalışma, laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenen Cyclic Borate Ester (CBE) adı verilen bir bor katkı maddesinin asfalt performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışmada, farklı oranlarda CBE içeren asfalt numuneleri üretilmiş ve bu numuneler üzerinde çeşitli testler uygulanmıştır. CBE'nin asfalt bağlayıcısının sertliğini artırdığı, yumuşama noktasını yükselttiği, viskoziteyi artırdığı ve tekerlek izi direncini geliştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, CBE'nin yaşlanma direncini artırdığı ve düşük sıcaklık çatlama direncini geliştirdiği belirtilmiştir. Bu çalışma, bor içeren katkı maddelerinin asfalt modifikasyonu alanında ne kadar etkili olabileceğini göstermektedir (Oruç & Yılmaz, 2016)

Bor atıklarının mineral dolgu maddesi olarak asfalt betonu üretiminde kullanımı, hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli faydalar sağlamaktadır. Yapılan bir çalışmada, bor atıkları asfalt betonunda mineral dolgu maddesi olarak kullanılmış ve farklı oranlardaki bor atığı içeren numuneler üzerinde Marshall stabilite, dolaylı çekme sertlik modülü testleri uygulanmıştır. Çalışma, bor atıklarının düşük ve orta trafik yoğunluğuna sahip yolların aşınma tabakalarında dolgu maddesi olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu da bor atıklarının çevreye zarar vermeden geri dönüştürülmesinin yanı sıra ekonomik anlamda da büyük katkılar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır (Gürer & Selman, 2016).

Son olarak, yapılan diğer bir çalışmada, bor minerallerinden biri olan üleksitin taş mastik asfalt (SMA) karışımlarında dolgu malzemesi olarak kullanılması incelenmiştir. Çalışmada, üleksitin SMA karışımına eklenmesiyle stabilite, dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve su hasarı gibi performans parametrelerinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır. Özellikle, üleksitin SMA performansını %13 oranında artırarak su hasarına karşı dayanıklılığı iyileştirdiği belirtilmiştir. (Kabadayı vd., 2024)

## 5. SONUÇLAR

Araştırmalarda, farklı bor bileşiklerinin asfalt performansına olan etkileri detaylı şekilde ele alınmıştır. Kırılmış Bor Atığı (CBW), Boraks Pentahidrat (BP) ve Susuz Boraks (BA) gibi bileşiklerin asfaltın dayanıklılığını artırdığı ve sürdürülebilirlik açısından uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca, nano boyuttaki magnezyum spinel oksit ve kolemanit gibi katkı maddelerinin, özellikle sıcak iklimlerde asfaltın yüksek sıcaklık

performansını artırarak tekerlek izi direncini geliştirdiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, bor oksit ve balmumu kombinasyonu da asfaltın hem işlenebilirliğini artırmakta hem de yüksek sıcaklık dayanımını iyileştirmektedir.

Son olarak, bor bileşikleri ile yapılan modifikasyonların asfaltın yaşlanma direncini artırdığı ve düşük sıcaklık çatlama direncini geliştirdiği gözlemlenmiştir. Cyclic Borate Ester (CBE) gibi kimyasal sentezlenmiş katkılar, asfaltın sertliğini ve elastikiyetini artırırken viskozitesini düzenlemiştir. Bor minerallerinden üleksit gibi minerallerin de taş mastik asfalt karışımlarında filler olarak kullanılması, su hasarına karşı dayanıklılığı artırmış ve asfalt performansını iyileştirmiştir. Bu sonuçlar, bor ve bor bileşiklerinin asfalt kaplamalarında kullanılarak daha dayanıklı, uzun ömürlü ve evre dostu yol yapımına katkıda bulunabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, yapılan literatür incelemesi, bor ve bor içeren bileşiklerin asfalt kaplamalarında kullanımının asfaltın mekanik özelliklerini iyileştirmek ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemek açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bor atıklarının geri dönüştürülerek asfalt karışımlarında kullanılması, sadece evre kirliliğini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda ekonomik faydalar da sunmaktadır. Türkiye gibi büyük bor rezervlerine sahip ülkeler için, bu atıkların asfalt kaplamalarında kullanılması, hem çevresel sorunların çözülmesi hem de ekonomik kazanç sağlanması açısından önemlidir.

## KAYNAKÇA

- Elevli, B., Yaman, İ., & Laratte, B. (2022). Estimation of the Turkish Boron Exportation to Europe. *Mining*, 2(2), 155-169. <https://doi.org/10.3390/mining2020009>
- Fan, L., Song, X. J., & Zhang, Y. Z. (2011). Experimental Research on Road Performance of Natural Asphalt Modified Asphalt Mixtures. *Applications of Engineering Materials*, 287, 762-766. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.762>
- Gürer, C., & Selman, G. Ş. (2016). Investigation of properties of asphalt concrete containing boron waste as mineral filler. *Medziagotyra*, 22(1), 118-125. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.22.1.12596>
- He, C., & Zhong, J. X. (2013). Structures, stability, mechanical and electronic properties of  $\alpha$ -boron and  $\alpha^*$ -boron. *AIP Advances*, 3(4), 042138. <https://doi.org/10.1063/1.4804138>
- Kabadayı, E., Çavdar, E., Kumandaş, A., Şahan, N., & Oruç, Ş. (2024). Investigation of Using Ulexite as a Filler in Various Combinations in Stone Mastic Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(2). <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-16231>
- Keskin, M., & Karacasu, M. (2019a). Effect of boron containing additives on asphalt performance and sustainability perspective. *Construction and Building Materials*, 218, 434-447. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.133>
- Keskin, M., & Karacasu, M. (2019b). Effect of boron containing additives on asphalt performance and sustainability perspective. *Construction and Building Materials*, 218, 434-447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.133>
- Li, N., & Huang, W. (t.y.). Comparative Research on the Performance Grading of RPRS Modified Asphalt.
- Oruç, Ş., & Yılmaz, B. (2016). Improvement in performance properties of asphalt using a novel boron-containing additive. *Construction and Building Materials*, 123, 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.003>
- Öcal, A., Gürü, M., & Karacasu, M. (2018). Nano magnezyum spinel ve kolemanit ile bitümün performans özelliklerinin geliştirilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3), 939-951. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416397>
- Schubert, D. M. (2019). Boron: Inorganic Chemistry. İçinde *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry* (ss. 1-21). John Wiley &



Sons, Ltd.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119951438.eibc0024.pub3>

- Şahan, N., Oruç, Ş., Çavdar, E., Kumandaş, A., Kabadayı, E., & Kök, B. V. (2024). Investigation of the Effect of Boron Oxide and Beeswax on Workability and High-Temperature Performance of Bitumen. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09014-5>
- Truong, B. T., Nguyen, M. T., & Nguyen, M. T. (2014). ChemInform Abstract: Structural Similarity Between Boron Oxide  $Bn(BO)_n^{2-}$  and Boron Hydride  $BnHn^{2-}$  Dianions ( $n = 4-12$ ). *ChemInform*, 45(39). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/chin.201439001>
- Wu, Y. D. (2014). The Performance Evaluation of Modified Asphalt by Polyphosphoric Acid and SBS. *Applied Material Science and Related Technologies*, 898, 350-354. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.898.350>
- Yeşilçiçek, H., Oruç, Ş., & Gülfer Bozdemir, M. (2022). Characterization and rheological properties of asphalt binder with a novel tall oil-based boron additive to enhance asphalt performance. *Construction and Building Materials*, 359, 129510. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129510>
- Yunquan, L., Xinghua, F., & Huaizhi, Z. (2010). Development and Evaluation of the Hard-Grade Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(8), 800-805. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000017](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000017)

## 5. Bölüm

### Taş Mastik Asfalt Kaplamalar

**Ersoy KABADAYI<sup>1</sup>**

1

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör., Giresun Üniversitesi Keşap Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü,  
[ersoy.kabadayi@giresun.edu.tr](mailto:ersoy.kabadayi@giresun.edu.tr), ORCID: 0000-0003-4062-3117

## ÖZET

Taş Mastik Asfalt (TMA), yüksek performans gerektiren yol kaplama projelerinde, özellikle yoğun trafik yüklerine maruz kalan bölgelerde tercih edilen bir asfalt türüdür. TMA, iri agrega içeriği ve yüksek bitüm oranı ile dikkat çekmektedir. Bu yapı, TMA'nın deformasyon, aşınma ve çatlama gibi yaygın asfalt sorunlarına karşı direnç göstermesini sağlamaktadır. Yapısındaki iri agregalar, asfaltın mekanik dayanıklılığını artırırken, stabilizatör katkıları asfalt karışımının sıcaklık dalgalanmalarına karşı daha dirençli olmasını sağlamaktadır. TMA, özellikle suya karşı direnci ve tekerlek izi oluşumunu azaltma kapasitesi ile öne çıkmaktadır. Bu özellikler, TMA'nın uzun ömürlü bir kaplama malzemesi olarak tercih edilmesinde önemli rol oynar. Asfaltın yüzey pürüzlülüğü, kayma direncini artırarak sürüş güvenliğini sağlar. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı yapısı sayesinde sıcak iklimlerde de başarılı sonuçlar vermektedir. Ayrıca, düşük bakım gereksinimi sayesinde uzun yıllar boyunca sorunsuz bir şekilde kullanılabilir, bu da onu ekonomik olarak da avantajlı kılar.

Ancak, TMA'nın üretim sürecinde karşılaşılan bazı zorluklar da mevcuttur. Karışımın hazırlanması ve dökülmesi esnasında yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulması, enerji maliyetlerini artırır. Bu da TMA'nın çevresel etkilerini artıran bir faktör olarak öne çıkar. Ancak bu dezavantajlar, geri dönüştürülmüş malzemelerin karışımda kullanılmasıyla hafifletilebilir.

TMA'nın sürdürülebilirlik potansiyeli, bu tür çevre dostu uygulamaların artırılmasıyla daha da geliştirilebilir. Yapılan araştırmalar, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı ile TMA'nın dayanıklılık özelliklerinin korunabileceğini ve çevresel sürdürülebilirliğinin artırılabilirliğini göstermektedir. Dolayısıyla, TMA'nın hem performans hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından gelecekte de önemli bir yol kaplama malzemesi olarak kullanılmaya devam edeceği öngörülmektedir..

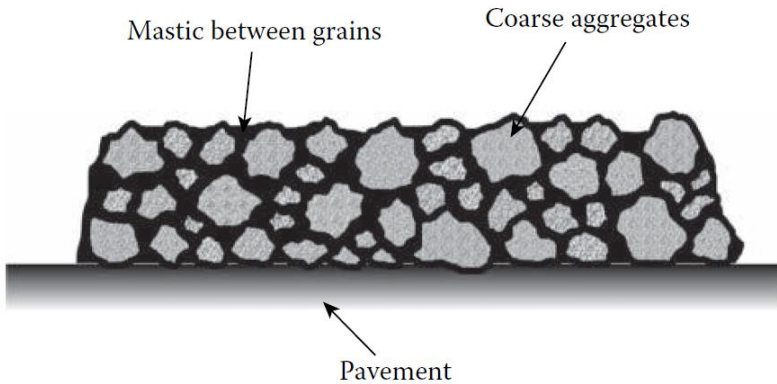
**Anahtar kelimeler:** Taş Mastik Asfalt, yol kaplamaları, bitüm, stabilizatör, çevresel sürdürülebilirlik, geri dönüştürülmüş malzemeler, yüksek performans, su direnci

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Taş Mastik Asfaltın Tanımı ve Tarihçesi

Taş Mastik Asfalt, 1960'ların sonlarında Almanya'da geliştirilmiş yüksek performanslı bir asfalt kaplama türüdür. Öncelikli olarak yoğun trafik yüklerine maruz kalan yollar için tasarlanmıştır. TMA, büyük ölçüde taşıyıcı agregalar ve bir bağlayıcı kombinasyonu ile oluşturulmuş, yüksek boşluk oranına sahip, dayanıklılığı artırılmış bir kaplama türüdür. Yapısında iri agrega, bitüm, dolgu maddeleri ve stabilizatörler (genellikle selüloz veya sentetik lifler) kullanılır. Bu yapısal bileşim, TMA'ya yüksek aşınma direnci, kayma direnci ve deformasyon karşısında uzun ömürlülük sağlar (Read & Whiteoak, 2003).

TMA'nın temel bileşenleri arasında, iri agrega oranının yüksek olması dikkat çeker. Yüksek agrega içeriği, TMA'nın mekanik dayanımını artırır ve daha yüksek trafik yüklerine karşı direncini sağlar. İnce agregalar ve dolgu maddeleri ise bitüm bağlayıcıyı stabilize ederek karışımın bir arada tutulmasına yardımcı olur. Stabilizatörler, bitüm bağlayıcının kaplama yüzeyinden dışarı sızmasını önleyerek TMA'nın yüksek sıcaklıklarda da stabil kalmasını sağlar. TMA, özellikle aşırı trafik yükleri ve ağır araç trafiği olan yollarda üstün performans göstermektedir. Almanya'da ilk uygulamalarından sonra, TMA'nın aşınma direnci ve düşük bakım gereksinimi gibi avantajları hızla fark edilmiş ve dünya çapında birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1990'larda Avrupa'da ve ABD'de yaygınlık kazanan TMA, otoyollar, havaalanı pistleri ve şehir içi yollar gibi kritik taşıma altyapılarında kullanılmaktadır (E. Brown et al., 1997).



**Şekil 1.** Sıkıştırılmış TMA asfalt kaplama içeriği

TMA'nın performansı, yüzeydeki suyun hızlı tahliyesi, kayma direncinin yüksek olması ve çatlama gibi yorgunluk hasarlarına karşı dayanıklılığı ile

ilişkilidir. Bu özellikleri sayesinde, asfalt kaplamalarda daha az deformasyon ve daha uzun ömür sağlanmakta, bu da işletme maliyetlerini düşürmektedir (Jung et al., 2002). TMA'nın önemli avantajlarından biri de, düşük bakım maliyetleri sunmasıdır; bu da yoğun trafikli yolların sık sık kapatılmasını engelleyerek ulaştırma projelerinde sürekliliği artırır.(Prowell et al., 2010)

Sonuç olarak, TMA'nın tanımı ve tarihçesi incelendiğinde, bu asfalt türünün gelişiminde temel etkenin ağır trafik yükleri altında dayanıklı bir yol kaplaması ihtiyacı olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek agrega içeriği ve stabilizatörlerle güçlendirilmiş yapısı sayesinde, Taş Mastik Asfalt, yol performansı ve uzun ömürlülük açısından modern ulaştırma projelerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, dünya genelinde birçok ülkede tercih edilen bir kaplama yöntemi haline gelmiştir.

## **2. TAŞ MASTİK ASFALTIN GELİŞİMİ VE KULLANIM ALANLARI**

Özellikle ağır trafik yüklerine ve aşırı çevresel etkilere maruz kalan otoyollar için tasarlanan TMA, zamanla üstün aşınma direnci ve uzun ömürlülüğü ile dünya genelinde tercih edilen bir asfalt kaplama türü haline gelmiştir (Brown ve Mallick, 1994). İlk uygulamalarından itibaren elde edilen başarılı sonuçlar, TMA'nın Avrupa'da ve daha sonra ABD, Kanada ve Asya gibi bölgelerde yaygın şekilde kullanılmasına yol açmıştır(E. R. Brown & Mallick, 1994).

TMA'nın gelişiminde temel faktör, iri agrega ile bitümlü bağlayıcı arasında optimal bir matris oluşturularak asfalt kaplamalarının dayanıklılığını artırmak olmuştur. Yüksek yoğunluklu taşıyıcı agrega içeriği, TMA'yı diğer sıcak karışım asfalt (HMA) türlerinden ayıran en önemli özelliktir. TMA'da kullanılan agregalar, yüksek boşluk oranına sahip bir karışım oluştururken, stabilizatör katkı maddeleri bitümün karışımdan dışarı sızmasını engeller, bu da yüksek sıcaklıklarda deformasyon riskini azaltır (Read & Whiteoak, 2003).

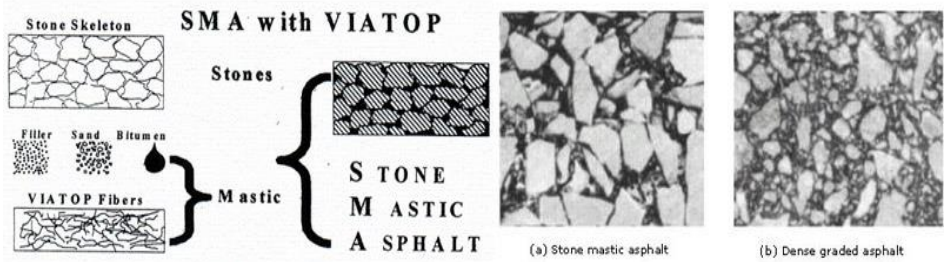
TMA'nın başlıca kullanım alanları arasında otoyollar, havaalanı pistleri, tır garajları, köprüler ve kavşaklar yer alır. Yoğun trafiğe maruz kalan bu tür yol ve yapıların tercih edilmesinin nedeni, TMA'nın üstün aşınma direnci, kayma direnci ve düşük bakım gereksinimi ile uzun ömürlü bir çözüm sunmasıdır (Ranadive et al., 2018). TMA'nın bir diğer önemli kullanım alanı ise şehir içi yollardır. Şehirlerde artan trafik yoğunluğu ve sık dur-kalk hareketleri nedeniyle asfalt yüzeylerin hızla aşındığı bilinir. Bu nedenle, birçok şehirde yol yenileme projelerinde TMA tercih edilmektedir.

TMA'nın dünya genelinde yaygınlaşmasındaki önemli bir faktör de düşük bakım maliyetidir. Diğer asfalt kaplamalarına kıyasla daha az bakım gerektiren TMA, özellikle otoyollar ve havaalanları gibi sürekli olarak kullanılan alanlarda

maliyet tasarrufu sağlar. Bu özellik, uzun vadede hem devlet kurumları hem de özel sektör için ekonomik bir fayda sunmaktadır (Tutu & Tuffour, 2016).

### 3. TAŞ MASTİK ASFALTIN BİLEŞİMİ VE KARIŞIM TASARIMI

TMA'nın en temel bileşeni, iri agrega içeriğidir. Bu iri agregalar, karışımın taşıyıcı matrisini oluşturur ve asfaltın yüksek trafik yüklerine karşı direncini artırır. İri agregalar arasında genellikle granit, bazalt ve kireçtaşı gibi yüksek mukavemetli malzemeler tercih edilir. TMA karışımında kullanılan agregalar, sıkı bir granülometri yapısına sahiptir, bu da karışımın boşluk oranını optimize ederek mukavemeti artırır (Punith et al., 2004).



Şekil 2. TMA kaplamanın karışım matrisi içeriği

Bitüm, TMA'nın bağlayıcı malzemesidir ve agregaları bir arada tutarak karışımın elastik özelliklerini sağlar. TMA'da kullanılan bitüm, karışımın sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığını artırırken aynı zamanda elastikiyetini de korur. Bu, TMA'nın yorgunluk hasarlarına karşı dayanıklı olmasını sağlar. Ayrıca, kullanılan bitüm miktarı diğer karışım türlerine göre genellikle daha yüksektir, bu da karışımın suya ve aşınmaya karşı direncini artırır (Read & Whiteoak, 2003). Dolgu malzemeleri, TMA karışımındaki ince agregaları tamamlayarak karışımın boşluklarını doldurur. Dolgu olarak genellikle kireçtaşı unu veya mineral tozlar kullanılır. Bu malzemeler, bitüm ile agregalar arasındaki bağın güçlenmesine yardımcı olarak karışımın yapısal bütünlüğünü sağlar. Dolgu malzemeleri aynı zamanda asfaltın sertliğini ve elastikiyetini artırarak çatlamaya karşı dayanıklılığı artırır. TMA'nın yüksek boşluk oranını korurken bitümün karışımından dışarı sızmasını engellemek için stabilizatörler kullanılır. Bu stabilizatörler genellikle selüloz veya sentetik liflerden oluşur. Stabilizatörler, asfaltın homojenliğini korumak için önemlidir ve yüksek sıcaklıklarda bitümün ayrışmasını önleyerek TMA'nın deformasyon karşısında stabil kalmasını sağlar (Prowell et al., 2010).

TMA karışım tasarımı, çeşitli performans gereksinimlerine uygun olarak

optimize edilir. Bu tasarım süreci, iri agrega matrisinin dayanıklılığını artırmaya odaklanırken, bağlayıcı ve stabilizatörlerin doğru kombinasyonunu sağlar.

*Agrega Seçimi ve Granülometri:* Karışımda kullanılan agregaların büyüklüğü, sertliği ve dağılımı karışımın dayanıklılığını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Agregaların uygun granülometri ile karıştırılması, boşluk oranının optimize edilmesine ve asfaltın yük taşıma kapasitesinin artmasına katkı sağlar.

*Bitüm Miktarının Belirlenmesi:* Bitüm miktarı, karışımın dayanıklılığı ve esnekliği açısından kritik bir rol oynar. TMA'da genellikle daha yüksek bitüm oranı tercih edilir. Bu oran, karışımın sıcaklık değişimlerine ve ağır trafik yüklerine karşı dayanıklılığını sağlar.

*Stabilizatör Katkı Maddesi İlavesi:* Stabilizatörlerin eklenmesi, TMA'nın dayanıklılığını artırmak için son aşamada yapılır. Karışımın stabil kalmasını ve yüksek sıcaklıklarda bitümün dışarı sızmasını önler.

*Karışımın Laboratuvar Testleri:* TMA karışımı tasarlanırken, karışımın mekanik performansını ölçmek için çeşitli testler yapılır. Bu testler, karışımın sertliği, elastikiyeti, aşınma direnci ve deformasyona karşı direncini ölçer. Tasarım süreci boyunca elde edilen veriler, karışımın optimize edilmesi için kullanılır (E. Brown et al., 1997).

#### **4. TAŞ MASTİK ASFALTIN MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ**

TMA, mekanik dayanıklılığı ve mukavemeti ile ön plana çıkar. Bir çalışma, SMA'nın farklı yükleme hızları altında tepe mukavemeti ve elastik modülünü inceleyerek bu malzemenin yük taşıma kapasitesine dair önemli bulgular elde etmiştir. Bu çalışma, TMA'nın suya ve aşınmaya karşı direncinin, yapıların mukavemetini ve dayanıklılığını artırmada kritik rol oynadığını ortaya koymuştur (Kabadayı et al., 2024)

TMA'nın yük taşıma kapasitesi de oldukça yüksek olup, özellikle suya ve aşınmaya karşı dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Başka bir çalışma, TMA'nın dayanıklılık ve mukavemetinin iç takviyelerle artırılabilirliğini ve bu sayede yük taşıma kapasitesinin daha da güçlendirilebileceğini göstermiştir (Jasni et al., 2020).

TMA'nın suya ve aşınmaya karşı direnci, asfalt karışımındaki taş dolgu maddelerinin ve kullanılan bitüm bağlayıcının özellikleriyle doğrudan ilgilidir. Özellikle suyun nüfuz etmesine karşı dirençli olan TMA karışımları, hem aşınma hem de uzun vadeli su hasarına karşı oldukça dayanıklıdır.

TMA, yüzey sürtünmesini artırarak sürüş güvenliğine katkıda bulunur. Özellikle yüksek hız ve zorlu koşullarda bile, SMA'nın yüzey özellikleri

sürtünme katsayısını olumlu yönde etkileyerek güvenliği artırır. Bir çalışmada, TMA'nın su altında dahi sürtünme katsayısının sabit kaldığı ve bu sayede sürüş güvenliği sağladığı ortaya konmuştur (Wasilewska, 2017).

## **5. TAŞ MASTİK ASFALTIN UYGULAMA TEKNİKLERİ**

TMA uygulamaları, dikkatli planlama ve belirli prosedürlerin takip edilmesini gerektirir. Uygulama süreci, karışımın üretimi ve sıcaklık kontrolü ile başlar. TMA, karışımın kararlılığını sağlamak için genellikle yüksek sıcaklıklarda üretilir ve nakledilir. Karışım, üretim tesisinden alınıp uygulama alanına kadar belirli bir sıcaklık aralığında korunmalıdır. Aksi takdirde, soğuma veya homojen olmayan sıcaklık dağılımları, karışımın performansını olumsuz etkileyebilir (Blazejowski, 2011)

### **5.1. Uygulama Yöntemleri ve Ekipmanlar**

TMA'nın uygulanmasında kullanılan temel ekipmanlar arasında asfalt plentleri, nakliye araçları, asfalt döşeme makineleri (finisher) ve sıkıştırma silindirleri bulunmaktadır. Uygulama yöntemleri, karışımın taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması adımlarını içerir. TMA'nın taşınması sırasında karışımın sıcaklık kaybını önlemek için izolasyonlu kamyonlar kullanılması yaygındır (Ayyıldız et al., 2021)

Karışımın yerleştirilmesinde, asfalt döşeme makineleri büyük önem taşır. Özellikle finisher olarak bilinen bu makineler, asfaltın düzgün bir tabaka halinde serilmesini sağlar. Ayrıca, karışımın kalınlığı ve sıcaklığı kontrol edilmelidir. Bu adımda karışımın homojenliği ve düzgün serilmesi, nihai kaplamanın kalitesini belirler.

### **5.2. Yerleştirme ve Sıkıştırma Süreçleri**

TMA'nın yerleştirilmesi ve sıkıştırılması, dikkatlice yönetilmesi gereken kritik aşamalardır. İlk olarak, asfalt karışımı yüzeye serilirken, istenen kalınlık ve düzgünlük sağlanmalıdır. Bunun ardından sıkıştırma işlemi başlar. Sıkıştırma, genellikle vibrasyonlu ve statik silindirler ile yapılır. Sıkıştırma işleminin başarısı, asfaltın yoğunluğunu ve dayanıklılığını artırır. Farklı tipte silindirler kullanılarak, sıkıştırma işlemi aşamalı olarak gerçekleştirilir (Aluç & Ahıskalı, 2023).

Sıkıştırma işleminin etkili olabilmesi için sıcaklık büyük bir rol oynar. Sıkıştırma sırasında TMA'nın belirli bir sıcaklık aralığında kalması gerekir. Çok soğuk karışım, yeterince sıkıştırılamaz ve istenen yoğunluğa ulaşamaz. Çok sıcak karışım ise aşırı sıkışarak mastik kaybına neden olabilir. Bu nedenle, sıcaklık kontrolleri sürekli yapılmalı ve karışımın optimum sıcaklıkta serilip sıkıştırıldığından emin olunmalıdır.



### **5.3. İnşaat Sırasındaki Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar**

TMA uygulaması sırasında bazı önemli hususlar göz önünde bulundurulmalıdır. İlk olarak, hava koşulları uygulama sürecini etkileyebilir. Örneğin, yağışlı havalarda TMA uygulaması önerilmez, çünkü su karışımın yapısını bozabilir ve yüzeyde çatlaklar oluşmasına neden olabilir. Ayrıca, aşırı rüzgar, asfalt karışımının hızlı soğumasına neden olabilir, bu da serme ve sıkıştırma işlemlerinin verimliliğini düşürür (Gökalp & Emre Uz, 2017)

Diğer bir önemli husus ise yol yüzeyinin hazırlanmasıdır. TMA serilmeden önce yüzeyin düzgün olması ve eski asfalt katmanlarının iyice temizlenmiş olması gerekir. Bu adım, yeni asfalt katmanının mevcut yüzeye iyi yapışmasını sağlar ve uzun ömürlü bir yol yapısına katkıda bulunur.

Ayrıca, karışımın homojen dağılımı için kullanılan malzemelerin kalite kontrolü sağlanmalıdır. Agregası, mastik ve dolgu malzemelerinin doğru oranlarda karıştırılması, TMA'nın dayanıklılığını ve performansını doğrudan etkiler. Stabilizatör kullanımı, karışımın boşluklarını doldurur ve fazla mastik akışını önler, bu da asfaltın yüzey kalitesini artırır.

TMA, doğru uygulama yöntemleri ve dikkatli süreç yönetimi ile uzun ömürlü ve dayanıklı bir yol kaplaması sağlar. Uygulama sürecinde, sıcaklık kontrolü, malzeme kalitesi ve sıkıştırma yöntemleri dikkatlice izlenmeli ve yönetilmelidir. Ayrıca, çevresel koşulların ve yol yüzeyinin durumu da dikkate alınarak, karışımın doğru şekilde uygulanması sağlanmalıdır. TMA'nın sağladığı uzun ömür ve yüksek performans, dikkatli uygulama ve inşaat süreçleriyle doğrudan ilişkilidir.

## **6. TAŞ MASTİK ASFALTIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI**

TMA'nın en önemli avantajlarından biri, sunduğu uzun hizmet ömrüdür. Karışımındaki yüksek kaliteli agrega iskeleti, asfaltın ağır yükler altında deformasyona karşı dirençli olmasını sağlar. Özellikle ağır taşıt trafiğine maruz kalan yollar için idealdir. Ayrıca, TMA'nın yüksek bağlayıcı (bitüm) içeriği, yorulma ömrünü artırır ve karışımın çatlamasını önleyerek uzun yıllar boyunca sorunsuz bir şekilde kullanılmasını mümkün kılar. Yüksek sıcaklıklara karşı da dayanıklı olan bu karışım, sıcak iklimlerde ve ağır trafik yükü altında bile performansını korur (Blazejowski, 2011). Bunun yanında, TMA'nın yüzey makro tekstürü, su püskürtme ve gürültü yayılımını azaltmada etkili olduğundan, sürüş güvenliğini artırırken trafiğin neden olduğu gürültü kirliliğini de düşürmektedir. Bu özellikler, hem kullanıcı güvenliği hem de çevre üzerinde olumlu etkilere sahiptir (Jamieson & White, 2020)

TMA'nın avantajları kadar bazı dezavantajları da bulunmaktadır. İlk olarak,

uygulama sırasında bazı sorunlar meydana gelebilir. Örneğin, TMA'nın başlangıçtaki yüzey kayma direnci düşüktür ve bu durum, ince agrega serpilmesi veya kırma kum uygulanmadığında sürüş güvenliğini olumsuz etkileyebilir. Bununla birlikte, TMA'nın üretimi ve uygulanması sırasında yapılan hatalar yüzeyde lekelerinin oluşmasına neden olabilir. Bu lekeler hem estetik açıdan rahatsızlık yaratabilir hem de asfaltın performansını düşürebilir. Bir diğer önemli dezavantaj, TMA'nın diğer asfalt karışımlarına göre daha yüksek maliyetli olmasıdır. Bu maliyet farkı, karışımdaki yüksek miktardaki bağlayıcı, dolgu malzemesi ve stabilizatör kullanımından kaynaklanmaktadır. Ancak, bu yüksek maliyet, asfaltın sunduğu uzun ömür ve düşük bakım gereksinimi sayesinde zaman içinde telafi edilebilir. Yine de ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, TMA'nın daha az bütçe ile yol projeleri yürüten kurumlar tarafından tercih edilmesini zorlaştırabilir (Shahin Eskandarsefat & Sangiorgi, 2020; Watson et al., 2008)



**Şekil 3.** Bağlayıcıda boylamasına yağ lekeleri.

Sonuç olarak, Taş Mastik Asfalt, yüksek performansı ve dayanıklılığı ile öne çıkan bir yol kaplama malzemesidir. Uzun ömür, deformasyon direnci ve çevresel faydalar gibi önemli avantajlar sunsa da, yüksek maliyet ve uygulama sırasında dikkat edilmesi gereken bazı zorluklar içermektedir. Bu nedenle, TMA'nın avantajları ve dezavantajları dikkate alınarak, doğru projelerde ve uygun koşullarda kullanılması, uzun vadede en iyi sonuçları elde etmek açısından kritik öneme sahiptir.

## 7. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE ÇEVRESEL ETKİLER

TMA, dayanıklı ve uzun ömürlü bir yol kaplama malzemesi olarak bilinir ve özellikle ağır trafik yükleri için tercih edilmektedir. Ancak, bu asfalt türü sadece teknik performansı ile değil, aynı zamanda çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik potansiyeli ile de değerlendirilmelidir. Sürdürülebilir yol yapımı kavramları göz önünde bulundurulduğunda, SMA'nın hem olumlu hem de olumsuz çevresel etkileri vardır.

Öncelikle, TMA'nın çevresel avantajlarından biri, uzun ömrü sayesinde bakım sıklığının azaltılmasıdır. Geleneksel asfalt karışımlarına göre daha dayanıklı olan bu malzeme, yol yüzeylerinin daha uzun süre yenilenmeden kullanılabilmesini sağlar. Bu durum, bakım sırasında kullanılan enerji, malzeme ve iş gücü ihtiyacını azaltarak çevreye olumlu katkıda bulunur. Özellikle ağır trafik koşulları altında deformasyona karşı yüksek direnç göstermesi, sık sık yol tamiraty yapılmasını engelleyerek çevresel maliyetleri düşürür (Xue et al., 2009).

Bunun yanı sıra, TMA'nın makro yapısı, yol yüzeyinde su püskürtmesini ve trafiğe bağlı gürültü seviyelerini azaltır. Yol yüzeyinin daha pürüzsüz olması ve su drenajı açısından optimize edilmesi, su birikimlerini ve suyun yüzeyde yayılmasını engelleyerek sürüş güvenliğini artırır. Ayrıca, düşük gürültü seviyeleri ile gürültü kirliliği sorununun azaltılmasına katkıda bulunur (Yaofei et al., 2021).

Ancak, TMA'nın sürdürülebilirlik açısından bazı dezavantajları da mevcuttur. Üretim sürecinde kullanılan enerji miktarı, geleneksel asfalt karışımlarına kıyasla daha yüksektir. TMA karışımının hazırlanması ve uygulanması sırasında daha yüksek sıcaklık gerektirmesi, fosil yakıt tüketimini ve dolayısıyla karbon salınımını artırabilir. Bu durum, özellikle büyük yol projelerinde önemli bir çevresel maliyet oluşturur. Ayrıca, TMA'nın içeriğinde kullanılan bağlayıcı miktarının fazlalığı, çevresel ayak izini artıran bir diğer faktördür (Sara Fernandes & Oliveira, 2019)

TMA'nın çevresel etkilerini azaltmak amacıyla geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. TMA karışımına geri dönüştürülmüş asfalt ve endüstriyel atık malzemelerin eklenmesi, hem hammadde ihtiyacını azaltır hem de atık yönetimi açısından olumlu katkılar sağlar (Zhong et al., 2024)

Sonuç olarak, Taş Mastik Asfalt, dayanıklılık ve uzun ömürlülük gibi avantajlarıyla çevresel açıdan önemli kazanımlar sağlayabilirken, üretim sürecinde kullanılan enerji miktarı ve bağlayıcıların çevresel etkileri gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Sürdürülebilir bir inşaat yaklaşımı benimsemek için, geri dönüştürülmüş malzemelerin entegrasyonu ve üretim süreçlerinin optimizasyonu gibi çevre dostu stratejiler uygulanmalıdır.

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

TMA, yüksek performans gerektiren yol kaplamalarında başarılı sonuçlar sunan bir kaplama malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Yapılan araştırmalar, TMA'nın özellikle ağır trafik yüklerine ve zorlayıcı çevresel koşullara karşı dirençli olduğunu göstermektedir. TMA'nın iri agrega içeriği, asfaltın mekanik dayanımını artırarak deformasyona karşı yüksek direnç sağlamaktadır. Ayrıca, bitüm ve stabilizatör katkı maddeleri sayesinde, asfalt karışımı yüksek sıcaklıklarda stabil kalmakta ve bitümün yüzeyden dışarı sızması önlenmektedir. TMA'nın suya ve aşınmaya karşı dayanıklı olması, yol ömrünü uzatırken, düşük bakım maliyetleri de uzun vadede maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Araştırmalar, TMA'nın yüzey sürtünmesini artırarak sürüş güvenliğini de olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur.

Gelecekteki araştırmalarda, TMA karışımında kullanılan malzemelerin optimizasyonu ve çevresel etkilerin azaltılması üzerine daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Özellikle geri dönüştürülmüş malzemelerin TMA karışımında kullanımının artırılması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir gelişme sağlayabilir. Ayrıca, farklı iklim koşullarında ve trafik yoğunluğu olan bölgelerde TMA'nın uzun vadeli performansını inceleyen saha çalışmaları yapılmalıdır. Stabilizatör ve katkı maddeleriyle ilgili yeni teknolojilerin geliştirilmesi, TMA'nın deformasyona ve çatlamaya karşı daha da dayanıklı hale getirilmesine katkı sağlayabilir. Üretim sürecinde enerji verimliliğini artıracak yenilikçi yaklaşımlar da çevresel etkileri minimize edebilir.

## KAYNAKÇA

- Aluç, S., & Ahıskalı, A. (2023). Application of Mastic Asphalt Using Rubber Added Modified Bitumen. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 6(1), 95–107. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1049296>
- Ayyıldız, D., İskender, E., & Aksoy, A. (2021). Taş mastik asfalt karışımlarda SBS/nanokil/bitüm nano-kompozitler için optimum bileşim oranının araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(4), 1847–1862. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.619772>
- Blazejowski, K. (2011). *Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice*. CRC Press.
- Brown, E., Mallick, R., Haddock, J., & Bukowski, J. (1997). Performance of stone matrix asphalt (SMA) mixtures in the United States. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 66.
- Brown, E. R., & Mallick, R. B. (1994). *STONE MATRIX ASPHALT PROPERTIES RELATED TO MIXTURE DESIGN*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:106869794>
- Gökalp, İ., & Emre Uz, V. (2017). Pürüzlendirme Uygulamasının Kaplama Yüzeyi Makro Dokusu Üzerine Olan Etkisinin Araştırılması. *Celal Bayar University Journal of Science*, 13(2), 545–554. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.320010>
- Jamieson, S., & White, G. (2020). Review of stone mastic asphalt as a high-performance ungrooved runway surfacing. *Road Materials and Pavement Design*, 21(4), 886–905. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1545688>
- Jasni, N. E., Masri, K. A., Ramadhansyah, P. J., Arshad, A. K., Shaffie, E., Ahmad, J., & Norhidayah, A. H. (2020). Mechanical Performance of Stone Mastic Asphalt Incorporating Steel Fiber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 712(1), 12026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/712/1/012026>
- Kabadaı, E., Çavdar, E., Kumandaş, A., Şahan, N., & Oruç, Ş. (2024). Investigation of Using Ulexite as a Filler in Various Combinations in Stone Mastic Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(2). <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-16231>
- Prowell, B., Watson, D. E., Hurley, G. C., & Brown, E. R. (2010). *Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) For Airfield Pavements*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113916588>
- Punith, V., Raju, S., Bose, S., Kumar, K., & Amirthalingam, V. (2004). *COMPARATIVE STUDIES ON THE BEHAVIOUR OF STONE MATRIX ASPHALT AND ASPHALT CONCRETE MIXTURES UTILISING RECLAIMED POLYETHYLENE*.

- Ranadive, M., Hadole, H., & Padamwar, S. (2018). Performance of Stone Matrix Asphalt and Asphaltic Concrete Using Modifiers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30, 4017250. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002107](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002107)
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook* (T. Telford, Ed.; Fifth).
- Sara Fernandes, H. M. R. D. S., & Oliveira, J. R. M. (2019). Mechanical, surface and environmental evaluation of stone mastic asphalt mixtures with advanced asphalt binders using waste materials. *Road Materials and Pavement Design*, 20(2), 316–333. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1387169>
- Shahin Eskandarsefat, B. H., & Sangiorgi, C. (2020). A comparison study on low-temperature properties of Stone Mastic Asphalts modified with PmBs or modified fibres. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(12), 1541–1549. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1554219>
- Tutu, K., & Tuffour, Y. (2016). Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review. *Open Journal of Civil Engineering*, 06, 84–93. <https://doi.org/10.4236/ojce.2016.62008>
- Wasilewska, M. (2017). Evaluation of Skid Resistance of Wearing Course Made Of Stone Mastic Asphalt Mixture in Laboratory Conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(2), 22043. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/2/022043>
- Watson, D. E., Vargas-Nordbeck, A., Moore, J., Jared, D., & Wu, P. (2008). Evaluation of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement in Stone Matrix Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record*, 2051(1), 64–70. <https://doi.org/10.3141/2051-08>
- Xue, Y., Hou, H., Zhu, S., & Zha, J. (2009). Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact. *Construction and Building Materials*, 23(2), 989–996. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.009>
- Yaofei, L., Zhengqi, Z., Ke, Z., Bo, Y., & Jianhua, Y. (2021). Test Evaluation on Vibration Reduction Effect of Compacted Stone Mastic Asphalt Mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(5), 04021092. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003675](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003675)
- Zhong, T., Zheng, Y., Chen, Z., Yao, L., Zhang, W., Zhu, Y., & Fu, L. (2024). Utilization of steel slag as coarse aggregate and filler in stone mastic asphalt (SMA) mixture: Engineering performance, environmental impact and economic benefits analysis. *Journal of Cleaner Production*, 450, 141891. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141891>

## 6. Bölüm

### Mezogözenekli Kalsiyum Silikat Malzemelerin, Seryum ve Demir Yüklenimi ile Birlikte Katalitik Performansları ve İlaç Salım Özellikleri

Fatma TOMUL<sup>1</sup>

Filiz AKTI<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Prof. Dr. Fatma TOMUL Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Türkiye ftomul@mehmetakif.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6771-3943

<sup>2</sup> Doç. Dr. Filiz AKTI Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü Türkiye filizakti@hitit.edu.tr ORCID No: 0000-0003-4455-514X.

## Özet

Bu çalışmada, mezogözenekli kalsiyum silikat (MKS), seryum yüklemeli mezogözenekli kalsiyum silikat (Ce@MKS) ve seryum ile birlikte demir yüklemeli mezogözenekli kalsiyum silikat (CeFe@MKS) malzemelerin diklofenakın (DCF) katalitik ıslak peroksit oksidasyonunda (Catalytic Wet Peroxide Oxidation, CWPO) katalitik performansları ve amoksisillin salım karakteristikleri incelenmiştir. Katalitik oksidasyon sonuçları 120 dakikalık oksidasyon süresi için değerlendirildiğinde her üç katalizöründe katalitik performanslarının yüksek olduğunu ve DCF derişimine bağılı olarak değıştığını göstermiştir. Ancak, 15 dakikalık oksidasyon süresi için seryum, ve demir ve seryum birlikte yüklemeli ürünlerin özellikle yüksek DCF derişiminde katalitik performanslarının metal yüklemesiz ürüne göre daha yüksek olduğu ve demir ilavesinin katalitik performansı daha fazla artırdığı görülmüştür. CeFe@MKS için sıcaklık artışı pek etkili olmazken, katalizör miktarı ve  $H_2O_2/DCF$  mol oranı ile dönüşüm değerlerinin önemli ölçüde arttığı, asidik reaksiyon şartlarında daha etkin olduğu görülmüştür. CeFe@MKS örneğı ile  $T=25^{\circ}C$ ,  $pH=3,7$ ,  $m_{kat}=1$  g/L,  $H_2O_2/DCF$  mol oranı 58 ve 20 mg/L DCF derişimi deneysel koşullarında 15 dakikada tam dönüşüme yakın DCF dönüşümü ve %23,6 Toplam Organik Karbon (TOC) dönüşümü elde edilmiştir.

MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS malzemelere bir antibiyotik olan amoksisillin yüklenmiş ve salım profilleri yapay vücut sıvısı ( $pH$  7,40 ve  $37^{\circ}C$ ) ve asidik ( $pH$  4 ve  $37^{\circ}C$ ) ortamda incelenmiştir. Amoksisillin yükleme başarısının tekli ve ikili kombinasyonda metal yükleme ile arttığı görülmüştür. Amoksisillin salım hızlarının salım ortamının özelliklerine bağılı olarak değıştığı, metal yüklemeli ürünlerin salım hızlarının asidik ortamda daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Mezogözenekli kalsiyum silikat, seryum, demir, DCF, amoksisillin



## 1. GİRİŞ

Günümüzde atık su kirliliği dünya genelinde en önemli çevre sorunlarından biri haline gelmiştir. İnsan ve hayvan hastalıklarının tedavisinde kullanılan farmasötik ilaçların artan tüketimi ve çevreye sürekli olarak verilmesi su faunası ve florası için uzun vadeli potansiyel tehlikeli etkileri ile hem halk sağlığı hem de çevre için bir tehdit unsuru oluşturmaktadır (Bui vd., 2009; Dao vd., 2018; Lima vd., 2019; Lonappan vd., 2016; Tran vd., 2017; Tomul vd., 2019). Bu farmasötik ilaçlar arasında, diklofenak (DCF; steroid olmayan bir anti-inflamatuar ilaç) tıpta çok kullanılan ağrı kesici ilaçlardan biri olduğu için, kentsel atık sularında, yüzey sularında ve aynı zamanda da içme suyu kaynaklarında bulunabilmektedir (Suriyanon vd., 2013; Lonappan vd., 2016). Çok düşük dozlarda bile endokrin sistemi olumsuz yönde etkilediği için su kirliliğine yol açan endokrin bozucu maddeler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, endokrin bozucu maddelerin atık sularından uzaklaştırılması önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Akti ve Tomul 2024; Huaccallo-Aguilar vd., 2021; De Oliveira vd., 2017).

Günümüzde, organik kirleticileri içeren atık suların arıtımında gözenekli malzemelerin kullanımıyla oda sıcaklığı ve atmosferik basınçta gerçekleştirilen CWPO teknolojisi ile arıtma, tatmin edici sonuçlar vermiştir (Yang vd., 2024). Bu bağlamda, aktif karbon gibi gözenekli malzemeler, farklı organik kirleticilerin (DCF dahil) gideriminde sıkça tercih edilmektedir (Bernardo vd., 2016; Larous vd., 2016; Jodeh vd., 2016). Ancak, özellikle endokrin bozucu maddelerin gideriminde CWPO teknolojisine dayanan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca, bu teknolojilerde etkili ve kararlı katalizörlerin kullanımı, sürecin verimliliğini artırmaktadır. Bu nedenle, CWPO reaksiyonlarında kullanılacak kararlı, etkili ve ekonomik katalizörlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu açıdan değerlendirildiğinde, metal yerleştirilmiş mezogözenekli kalsiyum silikat malzemeleri, yüksek yüzey alanı, büyük gözenek hacmi, mezogözenekli yapı ve metal içeriği gibi özellikleri ile hedef reaksiyonlar için uygun bir seçenek sunmaktadır. Ayrıca, basit ve ekonomik sentez koşulları göz önüne alındığında, seryum ve demir yerleştirilmiş mezogözenekli kalsiyum silikat malzemelerinin katalitik özelliklerinin incelenmesi önemlidir.

Kalsiyum silikat malzemeler, ilaç taşıma sistemleri olarak ta önemli bir potansiyele sahiptir. Bu malzemeler, biyoyumlu ve biyobozunur özellikleri sayesinde, ilaçların kontrollü ve hedefe yönelik salınımını sağlamak için ideal bir temel oluşturur. Kalsiyum silikatın gözenekli yapısı, yük taşıma kapasitesini artırırken, ilaçların yavaş ve düzenli bir şekilde salınmasına olanak tanır. Ayrıca, bu malzemelerin modifiye edilebilmesi, farklı ilaçların taşıma ve salım

özelliklerini optimize etmeye yardımcı olur. Sonuç olarak, kalsiyum silikatlar, etkili bir ilaç taşıma sistemi geliştirerek tedavi süreçlerinin etkinliğini artırabilir.

Bu çalışmada, Tomul vd., 2019 çalışması kapsamında sentezlenmiş mezogözenekli kalsiyum silikat, seryum ve/veya demir birlikte yüklenmiş mezogözenekli kalsiyum silikat malzemelerin hem katalitik performansları hem de ilaç taşıma sistemi olarak kullanım potansiyeli incelenmiştir. Katalitik performansları DCF'nin CWPO tepkimesinde, ilaç taşıma potansiyeli amoksisillin yüklenerek değerlendirilmiştir. DCF derişimi, katalizör miktarı, pH, sıcaklık, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/DCF molar oranı gibi bazı parametrelerin katalitik performans üzerine etkileri incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Malzemeler

Oksidasyon çalışmalarında sodyum diklofenak, sodyum hidroksit ve sülfürik asit, ilaç salım profillerinin belirlenmesinde amoksisillin kullanılmıştır. Sentezde kullanılan bütün kimyasal maddeler Sigma Aldrich'ten alınmış ve herhangi bir saflaştırma yapılmadan kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların her aşamasında ultrasaf su kullanılmıştır.

### 2.2. Katalizörlerin Karakterizasyon Sonuçlarının Yorumlanması

Oksidasyon ve ilaç yükleme çalışmalarında MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS kullanılmıştır. Bu malzemelerin sentezi ve karakterizasyon sonuçları, önceki çalışmamızda (Tomul vd., 2019) sunulmuştur. Reaksiyon ve ilaç yükleme açısından önemli olan bazı fizikokimyasal özellikler Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS örneklerin fizikokimyasal özellikleri (Tomul vd., 2019).

Örnek kodu	Atomik (%)						Yüzey Özellikleri					
	EDS						Yüzey Alan (m <sup>2</sup> /g)			Gözenek Hacmi (cm <sup>3</sup> /g)		
	O	Si	C	Ca	Ce	Fe	S <sub>BET</sub>	S <sub>dış</sub>	S <sub>mikro</sub>	V <sub>toplam</sub>	V <sub>mikro</sub>	V <sub>mezo</sub>
MKS	53,9	11,6	34,0	0,55	-	-	534	380	154	1,15	0,24	0,91
Ce@MKS	49,6	9,9	40,1	-	0,48	-	468	215	253	0,84	0,17	0,67
CeFe@MKS	53,6	11,7	33,9	0,15	-	0,76	634	447	187	0,76	0,31	0,45

MKS ve metal yüklemeli MKS malzemelerin homojen küresel morfoloji sergilediği, metal yüklemesiz MKS örneği için  $534 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  yüzey alan değerinin seryum yükleme ile azaldığı seryum ile birlikte demir yüklenen üründe ise arttığı belirtilmiştir. Seryum ve seryum ile birlikte demir yüklemeli ürünlerin toplam gözenek hacim değerlerinin yüklemesiz ürüne göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Benzer davranış, mezogözenek hacim değerlerinde de gözlenmiştir. Ancak demir/seryum yüklemeli ürünün mikrogözenek hacim değerinin yüklemesiz ürünün mikrogözenek hacim değerinden yüksek, seryum yüklemeli ürünün ise düşük olduğu bulunmuştur. MKS ve metal yüklemeli malzemelerin FTIR spektrumlarında silikatlar için karakteristik (Si-O-Si, Si-OH ve Si-O) bantların gözlemlendiği ve metallerin yüklenmesinden sonrada MKS yüzeyindeki ana fonksiyonel grupların korunduğu belirtilmiştir.

### **2.3. Katalitik Islak Peroksit Oksidasyon Testleri**

Kalsiyum silikat bazlı malzemelerin katalitik performansları üzerine başlangıç DCF derişimi ( $5\text{-}20 \text{ mg L}^{-1}$ ), pH (3,7; 5 ve 7), sıcaklık ( $25\text{-}55^\circ\text{C}$ ), katalizör miktarı ( $0,5\text{-}2 \text{ g/L}$ ) ve  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{DCF}$  mol oranı (30; 43,5 ve 58) gibi deneysel parametrelerin etkisi 5-120 dakikalık oksidasyon süresi için incelenmiştir. Oksidasyon çalışmaları ceketli cam reaktör sisteminde yürütülmüştür. Sıcaklık kontrolü sirkülasyonlu su banyosu ile sağlanmıştır. Reaksiyon süresince pH izlenmiş (Mettler Toledo pH metre) ve reaksiyon karışımının pH'sı 0,2 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  veya 0,2 M NaOH çözeltisi ile ayarlanarak korunmuştur. Hidrojen peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) çözeltisi ( $0,1 \text{ mol/L}$ ) DCF içeren çözeltiye tepkime başlangıcında tek basamakta ilave edilmiştir. Belirli zaman aralıklarında alınan örnekler analize kadar buzdolabında ( $4\pm 1^\circ\text{C}$ ) bekletilmiştir. DCF analizleri LC20 AT pompa, CTO-10ASVp kolon fırını, DAD dedektör, SIL 20ACHT otomatik örnekleyici donanımlı Shimadzu Prominence Marka HPLC cihazı ile yapılmıştır. HPLC ölçümlerinde ters faz olarak,  $150\times 4,6 \text{ mm}$  boyutlarına sahip, C-18,  $5\mu\text{m}$  çaplı Kromasil 100 kolonu kullanılmıştır. Mobil faz olarak, 25 mM ortofosforik asit, % 40 asetonitril ve % 60 su kullanılmıştır. Mobil faz debisi  $1,0 \text{ mL/dak}$  olarak seçilmiş ve ölçümler 240 nm, dalga boyunda gerçekleştirilmiştir. Toplam Organik Karbon (TOK) ölçümleri yakma metodu ile Shimadzu VCPH modeli ile yapılmıştır. Reaksiyon sürecinde reaksiyon karışımına geçen demir UNICAM 939 model AAS cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

### **2.4. Yeniden Kullanabilirlik**

Katalizörlerin yeniden kullanılabilirliğini belirlemek için CeFe@MKS katalizörü ile birbirini izleyen üç oksidasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Her

bir oksidasyon sürecinden sonra katalizör reaksiyon karışımından süzülerek ayrılmış, saf su ile yıkanmış ve bir gece 70°C sıcaklıkta bekletilmiştir.

### **2.5. Amoksisillin Yükleme ve Salım İşlemleri**

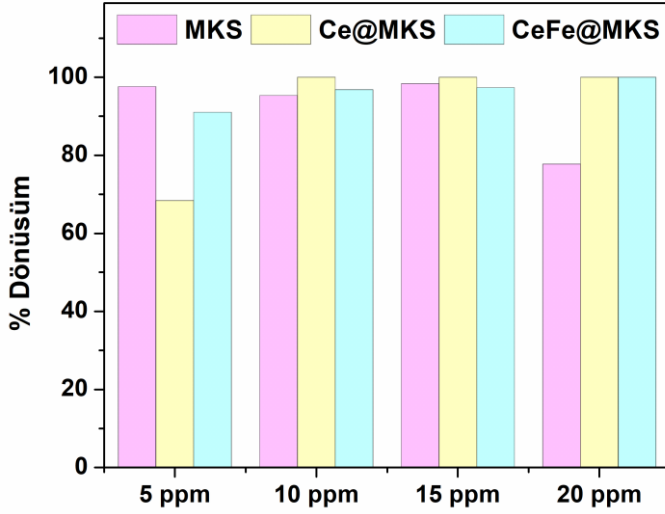
Amoksisillin yükleme için, 0,5 g MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS örnekler, 50 mL'lik amoksisillin çözeltisine (1,292 mg/mL) ilave edilmiş ve 24 saat karıştırılarak bekletilmiştir. Yüklemeden sonra oluşan süspansiyonlar santrifüj yöntemi ile sıvı fazdan ayrılmış ve ortam sıcaklığında kurutulmuştur. Yüklenen amoksisillin miktarı, yükleme öncesi ve sonrası amoksisillin derişimi (PG Instruments TG 60 model UV-VIS spektrofotometre ile 230 nm dalga boyunda belirlenen) arasındaki fark hesaplanarak belirlenmiştir.

Amoksisillin salım testi için 0,100 g ilaç yüklü MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS örnekleri 100 mL kapasiteli plastik behere aktarılmış ve üzerine 50 mL yapay vücut sıvısı (SBF) ilave edilmiştir. Yapay vücut sıvısı Kokubo ve Tadama 2006 ve Mozafari vd. 2019 tarafından önerilen reçeteye göre hazırlanmıştır. Salınım ortamının homojenliğini sağlamak için sürekli olarak 37°C'de karıştırılarak bekletilmiş ve belirli aralıklarla salım ortamından örnekler alınmıştır. Alınan örnekler, amoksisillin derişimini belirlemek için analiz edilmiştir. Elde edilen veriler salım profilini oluşturmak için kullanılmıştır.

## **3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA**

### **3.1. Reaksiyon Parametrelerinin CWPO Sonuçları Üzerine Etkisi**

Oksidasyon deneyleri, 5-20 mg/L DCF başlangıç derişimi, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/DCF mol oranı 58 (tam dönüşüm için gereken stokiyometrik oranın iki katı), 25°C, 3,7 pH, 1 g/L katalizör miktarı ve 120 dakika oksidasyon süresi koşullarında MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS katalizörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 1'de sunulmuştur. Tüm örneklerin, 120 dakikalık oksidasyon süresi göz önüne alındığında, DCF'nin CWPO reaksiyonundaki performanslarının yüksek olduğu ve başlangıç derişimine bağlı olarak değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. MKS ile yapılan çalışmalarda, 5 mg/L'den 15 mg/L'ye kadar DCF derişimlerinde %90'ın üzerinde dönüşüm elde edilirken, 20 mg/L DCF derişiminde 30 dakikalık oksidasyon süresinde dönüşüm oranlarının %77 seviyesine düştüğü belirlenmiştir. Ce@MKS ve CeFe@MKS katalizörleri kullanıldığında, 20 mg/L DCF derişimi için 15 dakikada seryum yüklemeli katalizör için yaklaşık % 95, seryum ve demir yüklemeli katalizör için neredeyse tam dönüşüm sağlanmıştır. Ancak, yüksek DCF dönüşümüne rağmen toplam organik karbon (TOC) dönüşümlerinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. En yüksek TOC dönüşümü (%23,6), CeFe@MKS ile 20 mg/L DCF derişimi için gerçekleştirilen oksidasyon deneyinde elde edilmiştir (Tablo 2).



**Şekil 1.** Farklı DCF derişimlerinde MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS katalizörlerin 120 dakika sonunda elde edilen DCF dönüşüm yüzdeleri.

**Tablo 2.** Ce@MKS ve CeFe@MKS örnekleri ile 120 dakikalık reaksiyon süresi için farklı CWPO reaksiyon koşullarında elde edilen TOC dönüşümleri.

Örnek kodu	Reaksiyon koşulları					% TOC dönüşümü
	Derişim (ppm)	pH	T (°C)	Katalizör miktarı (g/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /DCF oranı	
Ce@MKS	<b>20</b>	3,7	25	1	58	<b>11,1</b>
CeFe@MKS	<b>10</b>	3,7	25	1	58	<b>13,6</b>
	<b>20</b>	3,7	25	1	58	<b>23,6</b>
CeFe@MKS	10	<b>3,7</b>	25	1	58	<b>13,6</b>
	10	<b>5,0</b>	25	1	58	<b>5,6</b>
CeFe@MKS	10	3,7	<b>25</b>	1	58	<b>13,6</b>
	10	3,7	<b>40</b>	1	58	<b>17,3</b>
	10	3,7	<b>55</b>	1	58	<b>8,35</b>
CeFe@MKS	10	3,7	25	<b>1</b>	58	<b>13,6</b>
	10	3,7	25	<b>2</b>	58	<b>14,1</b>
CeFe@MKS	10	3,7	25	1	<b>30</b>	<b>17,1</b>
	10	3,7	25	1	<b>43,5</b>	<b>20,1</b>
	10	3,7	55	1	<b>58</b>	<b>8,35</b>

Oksidasyon süresi dikkate alındığında, seryum ve demir yüklemeli katalizör, DCF'nin CWPO reaksiyonunda en etkili katalizör olarak değerlendirilmiştir. Katalitik aktivite üzerinde etkili olan parametreler; katalizör miktarı, pH, sıcaklık ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/DCF mol oranı gibi faktörlerin DCF dönüşümüne etkileri, 10 mg/L DCF başlangıç derişimi için CeFe@MKS kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 2'de sunulmuştur.

Katalizör miktarındaki artışın DCF dönüşüm verimliliğini kayda değer ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir; 30 dakikalık oksidasyon süresi boyunca, katalizör miktarı 0,5 g/L iken %66 olan dönüşüm oranı 1 g/L'ye çıkarıldığında %88'e, 2 g/L'de ise %91'e yükselmiştir (Şekil 2a). Bu sonuçlar, katalizör miktarının artması ile oksidasyon hızının ve etkinliğinin arttığını, ancak 1 g/L ile 2 g/L arasında dönüşüm oranındaki artışın nispeten azalarak yavaşladığını göstermektedir. Bu davranış, yüksek katalizör miktarının çözümlüde homojen dağılımı zorlaştırabileceği ve katalizör parçacıklarının kümelenmesine yol açarak katalizör yüzeyine erişimi sınırlandırabileceği için reaksiyon hızının daha fazla artış göstermemesine neden olması ile açıklanabilir.

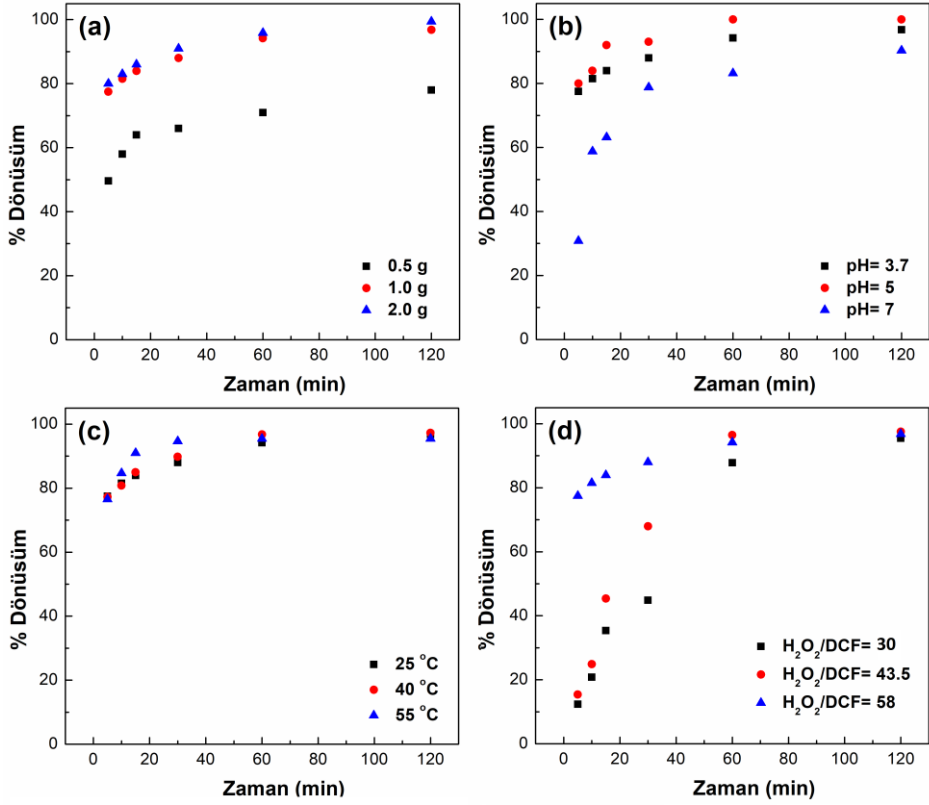
Katalizör miktarının 1 g/L'den 2 g/L'ye artırılmasının dönüşüm verimliliğinde sınırlı bir artış sağlaması nedeniyle, pH ve sıcaklık gibi diğer parametrelerin etkileri 1 g/L katalizör kullanılarak incelenmiştir. pH'nın DCF dönüşümü üzerindeki etkisi, 25 °C sıcaklık ve 10 mg/L DCF derişiminde pH 3,7; 5 ve 7 değerlerinde değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 2b'de sunulmuştur. Şekil 2b incelendiğinde, asidik pH koşullarında DCF dönüşüm oranlarının birbirine yakın olduğu; nötral pH'da ise düşük oksidasyon sürelerinde elde edilen dönüşüm oranlarının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Öte yandan, sıcaklığın DCF dönüşümü üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, 25 °C, 40 °C ve 55 °C'de 10 mg/L DCF, pH 3,7 ve 1 g/L CeFe@MKS kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 2c'de gösterilmiştir. Sıcaklığın 25 °C'den 55 °C'ye yükseltilmesi ile DCF dönüşüm değerlerinde anlamlı bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/DCF oranının DCF dönüşümü üzerindeki etkisi incelendiğinde (Şekil 2d), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/DCF oranının 30 değerinden 58 değerine artışı ile ilk 30 dakika içerisinde dönüşüm değerlerinde önemli bir artış (%45 düzeyinden %88 düzeyine) gözlemlenirken, ilerleyen oksidasyon sürecinde dönüşüm değerlerinde ciddi bir fark gözlemlenmemiştir. DCF dönüşüm değerinin 120 dakika sonunda yaklaşık %97 düzeyine ulaştığı görülmüştür.

Bu çalışmada, demir ve seryum yüklemeli katalizör kullanılarak gerçekleştirilen DCF'nin CWPO reaksiyonuna ilişkin elde edilen sonuçlar, Chong vd., 2017 tarafından bildirilenlerle karşılaştırıldığında daha yüksek DCF dönüşüm değerleri sergilemiştir. Chong vd. optimum koşullar altında (pH 5, 3 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> derişimi,

0,07 mmol/L DCF derişimi ve 0,5 g/L FeCeO<sub>x</sub>) 40 dakikalık oksidasyon süresinde %84 DCF dönüşüm değeri elde etmişlerdir.

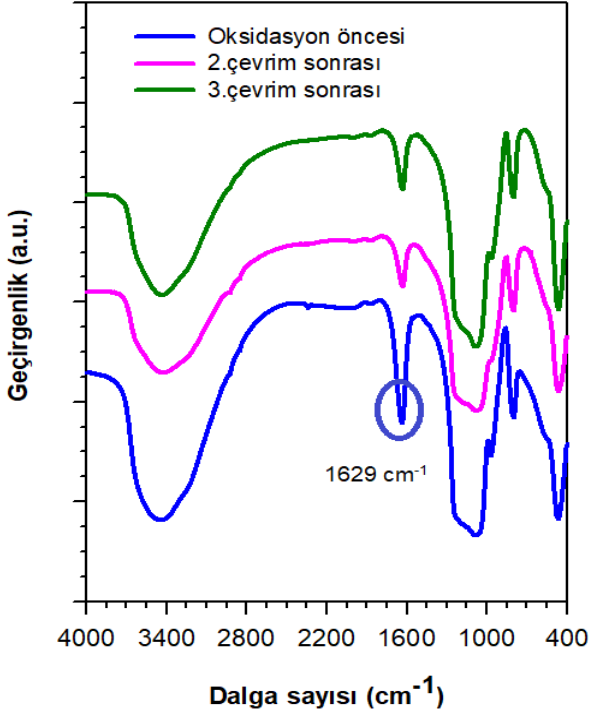


**Şekil 2.** Farklı reaksiyon koşullarında CeFe@MKS katalizör ile elde edilen DCF dönüşüm yüzdeleri (Reaksiyon koşulları: 10 ppm, 1g/L, pH=3,7, 25 °C, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/DCF=58).

### 3.2. Yeniden Kullanılabilirlik

Katalizörlerin en önemli avantajlarından biri rejenerasyon yapılmaksızın yeniden kullanılmasıdır. Yeniden kullanılabilirlik atıksu arıtımında reaktif tüketimini ve teknolojik basamakları azaltması açısından önemlidir. CeFe@MKS katalizörü ile 10 ppm DCF, 1 g katalizör/L, 25°C sıcaklık ve 3,7 pH oksidasyon koşullarında gerçekleştirilmiştir. Birbirini izleyen üç oksidasyon reaksiyonu sonunda DCF dönüşümünün 120 dakikalık oksidasyon süresince değişmediği ve %96 düzeyinde olduğu görülmüştür. Diğer taraftan üç kullanım sonunda katalizörün IR spektrumu Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde üç kullanım sonunda FTIR spektrumunda belirgin bir değişiklik olmadığı, sadece 1629 cm<sup>-1</sup>'deki su gerilim titreşim bandının şiddetinin azaldığı görülmüştür. 3 kez

kullanım sonunda FTIR spektrumunda ilave pik gözlenmemesi reaksiyon ortamında var olan organik moleküllerin adsorpsiyonu olmaksızın aktif sitelerde hidrojen peroksitin bozunması ile reaksiyonun oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca oksidasyon süresince çözeltiye demir geçişinin olmadığı belirlenmiştir. Bu davranış demir yüklemeli kalsiyum silikat malzemelerin hidrotermal dayanıklılığının yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuç sıvı faz oksidasyon reaksiyonları için demir yüklemeli kalsiyum silikat katalizörleri çekici hale getirmektedir.

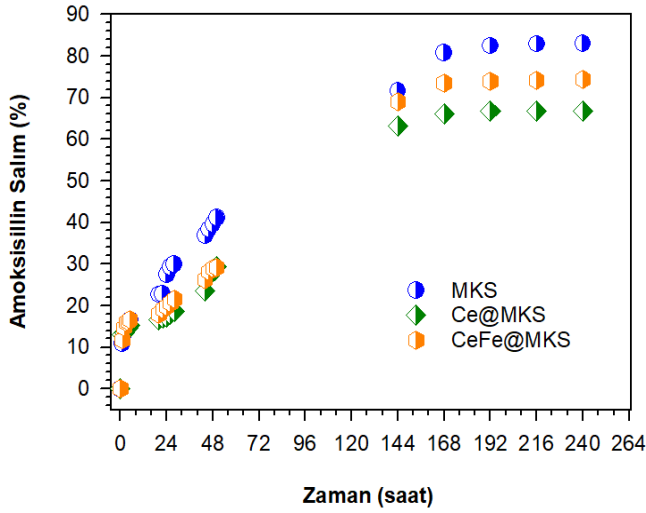


**Şekil 3.** CeFe@MKS katalizörün reaksiyon öncesi ve 3 çevrim oksidasyon sonrası FTIR spektrumları.

### 3.3. İlaç Yükleme ve Salım Sonuçları

Yüklenen amoksisillin miktarı, MKS için %28,42, Ce@MKS için %57,42 ve CeFe@MKS için % 54,72 olarak bulunmuştur. Seryum ve seryum ile birlikte demir yüklenmiş örnekler için yüklenen ilaç miktarının metal yüklemesiz örneğin neredeyse iki katı olduğu görülmüştür. MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS örneklerin yapay vücut sıvısı ortamında 240 saat salım süresinde ilaç salım profilleri Şekil 4'te gösterilmiştir.





**Şekil 4.** MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS örneklerin SBF ortamında (pH 7,40, 37°C) salım profilleri.

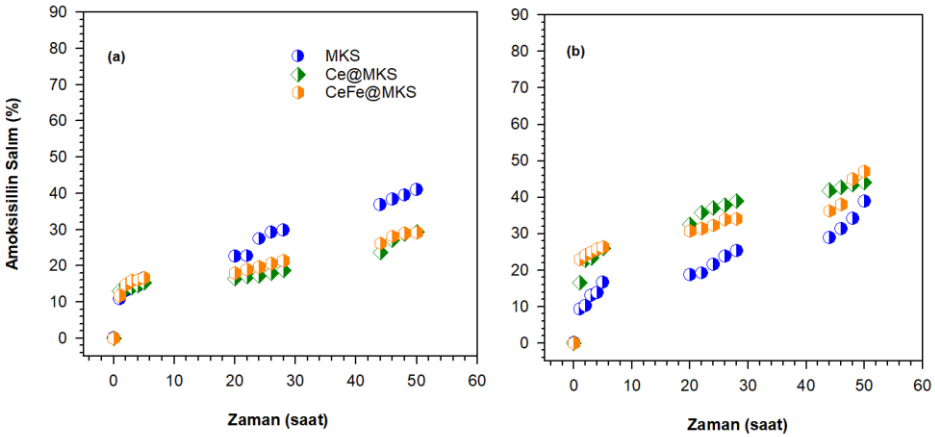
240 saatlik salım süresince amoksisilin salım profilleri değerlendirildiğinde, SBF ortamında hazırlanan MKS örneğinin yaklaşık %83 oranında en yüksek amoksisilin salımına ulaştığı; buna karşılık, Ce@MKS ve CeFe@MKS yapılarında bu oranların sırasıyla %67 ve %74 seviyelerinde kaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, metal iyonu yüklemesinin amoksisilin salımını kısıtlayıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle seryum yüklemesi, ilacın serbest bırakılma hızını azaltmakta ve bu durum, seryum ve/veya demir iyonlarının ilaç moleküllerini daha güçlü bir şekilde bağlayarak salım hızını düşürmesine bağlanmaktadır.

Salımın ilk 5 saatlik döneminde üç örneğin de benzer salım hızlarına ulaştığı görülmüş olup, MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS örneklerinde bu oranlar sırasıyla %16,56, %15,26 ve %16,63 olarak tespit edilmiştir. Ancak 24 saat sonunda bu değerlerin MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS için sırasıyla %27,46; %17,29 ve %19,68'e yükseldiği, bu noktadan sonra metal iyonu içermeyen MKS örneğinde salım hızının metal iyonu içeren örneklere göre daha hızlı arttığı ve 168 saat sonunda plato seviyesine ulaştığı gözlemlenmiştir (Şekil 4). MKS örneğinde gözlenen daha yüksek ve hızlı salım oranı, metal iyonlarıyla yükleme yapılmamış gözenekli yapının ilacı daha kolay serbest bıraktığına işaret etmektedir.

Bu bulgular ışığında, mezogözenekli kalsiyum silikat yapılarının metal iyonları ile yüklenmesi, amoksisilin salımını yavaşlatarak kontrollü bir salım

profili sunmaktadır. Özellikle seryum kullanıldığında, salım kontrol özellikleri daha belirgin hale gelmekte ve ilacın salım hızı düşmektedir. Sonuç olarak, metal yüklemeli mezogözenekli kalsiyum silikat yapılarının, kontrollü ilaç salım sistemlerinde potansiyel taşıyıcılar olarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

Aynı örneklerin pH 4 ortamındaki 50 saatlik amoksisilin salım profilleri, SBF ortamındaki profiller ile karşılaştırıldığında (Şekil 5), MKS örneğinin SBF ortamında 5 saatlik salım süresi boyunca %16,56 salıma ulaşırken, pH 4 ortamında ise %16,62 oranında amoksisilin salımına ulaştığı gözlemlenmiştir. Ce@MKS ve CeFe@MKS yapılarında ise bu oranlar SBF ortamında sırasıyla %15,26 ve %16,63 iken, pH 4 ortamında %25,99 ve %26,32 seviyelerinde kalmıştır. 50 saat sonunda ise SBF ortamında MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS örneklerinde amoksisilin salımı sırasıyla %41,03, %29,43 ve %29,21 düzeyine ulaşmışken (Şekil 5a); pH 4 ortamında aynı örnekler sırasıyla %38,82, %44,14 ve %47,16 oranlarında salım göstermiştir (Şekil 5b).



**Şekil 5.** MKS, Ce@MKS ve CeFe@MKS malzemelerin (a) SBF (b) pH 4 ortamında amoksisilin salım (%) profillerinin karşılaştırılması.

Bu sonuçlar, amoksisilin salım profillerinin ortamın pH değerine ve yapıdaki metal iyonu yüklemelerine göre değişiklik gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır. SBF ve pH 4 ortamlardaki salımlar karşılaştırıldığında, MKS örneğinde metal iyonu içermeyen yapının her iki ortamda da benzer oranlarda amoksisilin salımı sağladığı (%16,56 ve %16,62) ancak pH 4 ortamında metal iyonları ile yüklenmiş örneklerde (Ce@MKS ve CeFe@MKS) salım oranlarının daha belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, metal iyonları içeren yapıların daha asidik pH ortamında serbest bırakılma hızlarının yükseldiğini göstermektedir.

50 saat sonunda, MKS örneği SBF ortamında %41,03, pH 4 ortamında %38,82 salım değerlerine ulaşırken, metal iyonları ile yüklenmiş Ce@MKS ve CeFe@MKS yapılarında pH 4 ortamındaki salım oranları sırasıyla %44,14 ve %47,16'ya ulaşmıştır. Bu artış, asidik ortamda metal iyonlarıyla yüklenmiş yapılarının daha zayıf ilaç-etkileşimine sahip olabileceğini veya gözenek yapısının asidik ortamda ilacın serbest kalmasını kolaylaştırabileceğini düşündürmektedir. Özellikle CeFe@MKS örneğinin daha yüksek salım gösterdiği bu durum, metal yüklemeli mezogözenekli yapıların, ortam pH'sine bağlı olarak salım hızını değiştirme yeteneğine sahip olabileceğini göstermektedir.

Bu nedenle, pH duyarlılığına sahip kontrollü ilaç salım sistemlerinde metal iyonlarıyla yüklenmiş yapılar potansiyel taşıyıcılar olarak düşünülebilir; asidik ortamlarda daha yüksek ilaç salımı sağlayarak hedefli tedavi avantajı sunabilirler.

#### **4. SONUÇLAR**

Bu çalışmada diklofenakın oksidasyonu, katalitik ıslak peroksit oksidasyon tekniği ile mezogözenekli kalsiyum silikat ve seryum ve/veya demir yüklenmiş mezogözenekli kalsiyum silikat malzemeler varlığında incelenmiştir. Katalitik oksidasyon sonuçları, metal yüklemesiz ve seryum ve/veya demir yüklemeli katalizörlerin diklofenak oksidasyonundaki katalitik performanslarının katalizör özellikleri ve oksidasyon koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. En yüksek yüzey alanına sahip katalizör olan CeFe@MKS örneği ile 15 dakikada neredeyse tam dönüşümün sağlandığı görülmüştür. Sıcaklık artışı ile katalitik performansın değişmediği, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/DCF mol oranının artışı ile önemli düzeyde arttığı, pH'nın asidikten nötrale artışı ile oksidasyon hızını önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir. 120 dakika sonunda çözeltiliye demir geçişi gözlenmemiştir. 3 çevrim sonunda bile katalitik performansını (%96) korunduğu görülmüştür.

Amoksisilin ilaç salım performanslarında MKS malzemesinin ön plana çıktığı görülürken, ortam pH'nının nötralden asidiğe değişmesi ile birlikte metal yüklemeli malzemelerin performanslarının da iyileştiği görülmüştür. Tasarlanan malzemelerin hem diklofenakın katalitik ıslak peroksit oksidasyonu reaksiyonu için iyi bir aday katalizör, hem de ilaç salım sistemleri için iyi matris olacağı söylenilebilir.

#### **TEŞEKKÜR**

Bu çalışma Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 0325-NAP-16 nolu proje ile kısmen desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Akti, F., Tomul, F. Fabrication of Ag/Zr-SBA-15 materials in presence of tannic acid and their use in removal of organic pollutants from wastewater. *Materials Chemistry and Physics*. (2024), 326, 129817.
- Bui, T. X.; Choi, H. Adsorptive Removal of Selected Pharmaceuticals by Mesoporous Silica SBA-15. *J. Hazard. Mater.* 2009, 168, 602.
- Bernardo, M.; Rodrigues, S.; Lapa, N.; Matos, I.; Lemos, F.; Batista, M. K. S.; Carvalho, A. P.; Fonseca, I. High Efficacy on Diclofenac Removal by Activated Carbon Produced from Potato Peel Waste. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2016, 13, 1989.
- Chong, S., Zhang, G., Zhang, N., Liu, Y., Huang, T., Chang, H. (2017). Diclofenac degradation in water by FeCeOx catalyzed H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Influencing factors, mechanism and pathways. *Journal of hazardous materials*, 334, 150-159.
- Dao, Y.; Tran, H.; Tran-Lam, T.; Pham, T.; Le, G. Degradation of Paracetamol by an UV/Chlorine Advanced Oxidation Process: Influencing Factors, Factorial Design, and Intermediates Identification. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15, 2637.
- De Oliveira, T.; Guegan, R.; Thiebault, T.; Milbeau, C. L.; Muller, F.; Teixeira, V.; Giovanela, M.; Boussafir, M. Adsorption of diclofenac onto organoclays: Effects of Surfactant and Environmental (pH and Temperature) Conditions. *J. Hazard. Mater.* 2017, 323, 558.
- Huacalco-Aguilar, Y., De Tuesta, J. D., Álvarez-Torrellas, S., Gomes, H. T., Larriba, M., Ovejero, G., & García, J. (2021). New insights on the removal of diclofenac and ibuprofen by CWPO using a magnetite-based catalyst in an up-flow fixed-bed reactor. *Journal of Environmental Management*, 281, 111913.
- Jodeh, S.; Abdelwahab, F.; Jaradat, N.; Warad, I.; Jodeh, W. Adsorption of Diclofenac from Aqueous Solution using Cyclamen Persicum Tubers Based Activated Carbon (CTAC). *J. Assoc. Arab Univ. Basic Appl. Sci.* 2016, 20, 32.
- Kokubo, T., Takadama, H. How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? *Biomaterials*, 2006, 27(15), 2907-2915.
- Larous, S.; Meniai, A.-H. Adsorption of Diclofenac from Aqueous Solution Using Activated Carbon Prepared from Olive Stones. *Int. J. Hydrogen Energy* 2016, 41, 10380.
- Lima, D. R.; Hosseini-Bandegharaei, A.; Thue, P. S.; Lima, E. C.; de Albuquerque, Y. R. T.; dos Reis, G. S.; Umpierrez, C. S.; Dias, S. L. P.; Tran, H. N. Efficient Acetaminophen Removal from Water and Hospital Effluents Treatment by Activated Carbons Derived from Brazil Nutshells. *Colloids Surf., A* 2019, 583, 123966.

- Lonappan, L.; Brar, S. K.; Das, R. K.; Verma, M.; Surampalli, R. Y. Diclofenac and Its Transformation Products: Environmental Occurrence and Toxicity-A review. *Environ. Int.* 2016, 96, 127.
- Suriyanon, N.; Punyapalakul, P.; Ngamcharussrivichai, C. Mechanistic Study of Diclofenac and Carbamazepine Adsorption on Functionalized Silica-based Porous Materials. *Chem. Eng. J.* 2013, 214, 208.
- Tomul, F.; Arslan, Y.; Basoğlu, F. T.; Babucçuoğlu, Y.; Tran, H. N. Efficient Removal of Anti-Inflammatory from Solution by Fe- Containing Activated Carbon: Adsorption Kinetics, Isotherms, and Thermodynamics. *J. Environ. Manage.* 2019, 238, 296.
- Tran, N. H.; Gin, K. Y.-H. Occurrence and Removal of Pharmaceuticals, Hormones, Personal Care Products, and Endocrine Disrupters in a Full-Scale Water Reclamation Plant. *Sci. Total Environ.* 2017, 599–600, 1503.
- Yang, Y., Liu, M., You, X., Li, Y., Lin, H., Chen, J. P. (2024). A novel bimetallic Fe-Cu-CNT catalyst for effective catalytic wet peroxide oxidation: reaction optimization and mechanism investigation. *Chemical Engineering Journal*, 479, 147320.

## 7. Bölüm

### Atık Sulardan Boyar Maddelerin Mezogözenekli Kalsiyum Silikat ile Adsorpsiyonu: İzoterm ve Kinetik Analizler

**Fatma TOMUL<sup>1</sup>**  
**Diğdem TRAK<sup>2</sup>**  
**Filiz AKTI<sup>3</sup>**

---

<sup>1</sup> Prof. Dr. Fatma TOMUL Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Türkiye [ftomul@mehmetakif.edu.tr](mailto:ftomul@mehmetakif.edu.tr) ORCID No: 0000-0001-6771-3943

<sup>2</sup> Dr. Diğdem TRAK Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Türkiye [digdemtrak@gmail.com](mailto:digdemtrak@gmail.com) ORCID No: 0000-0001-8979-5505

<sup>3</sup> Doç. Dr. Filiz AKTI Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü Türkiye [filizakti@hitit.edu.tr](mailto:filizakti@hitit.edu.tr) ORCID No: 0000-0003-4455-514X

## Özet

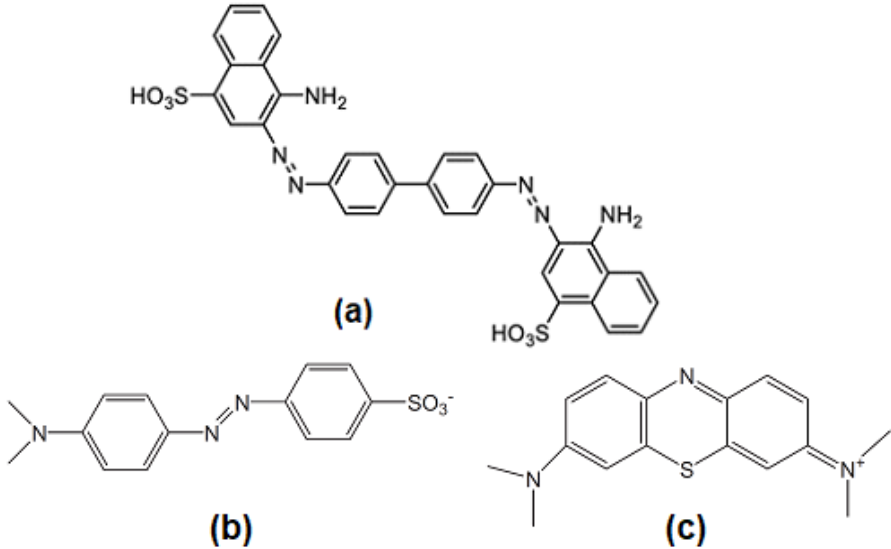
Çalışmada sulardan Kongo kırmızısı, Metilen mavisi ve Metil oranjın adsorpsiyon ile giderilmesi için adsorbent olarak mezogözenekli kalsiyum silikat malzeme sentezlenmiştir. Adsorpsiyona adsorbent miktarı, pH, temas süresi ve başlangıç derişiminin etkisi incelenmiştir. Farklı kinetik ve izoterm model eşitlikler kullanılarak adsorpsiyon kinetiği ve izoterm verilerinin model eşitliklere uyumu belirlenmiştir. Adsorbent miktarının artırılması ile adsorpsiyon verimi (2g/L adsorbent miktarı için % 96,80 verim) artarken adsorpsiyon kapasitesi azalmıştır. pH değişimi ile adsorpsiyon kapasitesi değerlerinde de giderim verimlerinde olduğu gibi önemli düzeyde olmayan artma ve azalmalar gözlenmiştir. En uygun model, en yüksek  $R^2$  ve en düşük  $\chi^2$  değerleri ile değerlendirildiğinde 20,718 mg/L Kongo kırmızısı derişimi için sırasıyla PFO, PSO, Bangham ve Elovich, 97,608 mg/L Kongo kırmızısı derişimi için ise sırasıyla Bangham, Elovich, PSO ve PFO olarak belirlenmiştir. Langmuir izoterm modelinin, deneysel izoterm verileri ile daha uyumlu olduğu ve modelden elde edilen maksimum adsorpsiyon kapasitesinin ( $q_m$ ) 106,094 mg g<sup>-1</sup> olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kalsiyum silikat, Kongo kırmızısı, Metilen mavisi, Metil oranj, adsorpsiyon

## 1. Giriş

Su, yaşamımızda temel bir rol oynamakta olup, sanayi ve tarım için kritik bir kaynak sağlamaktadır. Ancak, çeşitli insan faaliyetleri, çevreye zararlı yan ürünler ve atıklar bırakmakta, bu durum özellikle su yollarındaki ekosistemlerin dengesini bozmaktadır. Hızlı sosyo-ekonomik gelişim, su kaynaklarının kıtlığı ve belirli unsurların neden olduğu kirlilik, su yönetimini daha da zorlaştırmaktadır.

Bazı endüstriler, boya içeren atık sular üretmekte ve bu atıklar, suyun kalitesini bozarak insan sağlığını ve çevreyi tehdit etmektedir. Kongo kırmızısı, kendine özgü aromatik yapısı (Şekil 1a) nedeniyle biyolojik olarak zor bozulan, tekstil, deri, plastik, kağıt ve baskı endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan anyonik (asidik) bir diazo boyadır. Suda düşük derişimlerde bulunmasına rağmen parlak rengi nedeniyle su kalitesini bozmakta ve yüksek çözünürlük ile asidik yapısı, çevresel etkilere katkıda bulunmaktadır (El-Habacha vd., 2024). Metil oranjda, Kongo kırmızısı gibi iyi bilinen asidik/anyonik boyalardan biridir (Şekil 1b) ve tekstil, baskı, kağıt, gıda ve ilaç endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metilen mavisi (Şekil 1c), ahşap, ipek ve pamuk için en yaygın boyama malzemelerinden biridir. Su ve kara ekosistemlerinde meydana gelen toksik kirlenme, alerji, dermatit, cilt tahrişleri, mide-bağırsak irritasyonları ve insan vücudunda genetik mutasyonlar gibi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle Kongo kırmızısı, Metil oranj ve Metilen mavisi gibi boyar maddelerin sulardan giderilmesi çevre ve halk sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır (Siddiqui vd., 2023; Haque vd., 2011).



Şekil 1. (a) Kongo kırmızısı (Vairavel vd., 2017) (b) Metil oranj (Haque vd., 2011) (c) Metilen mavisi (Haque vd., 2011) boyaların moleküler yapıları



Kongo kırmızısı, Metil oranj ve Metilen mavisi içeren atık suların arıtılmasında, oksidasyon (Castro, vd., 2009; Ma vd., 2023; Akti ve Tomul 2024) ve pıhtılaşma-topaklaştırma gibi kimyasal yöntemler (Goudjil, vd., 2021; Ahmed vd., 2022; Ihaddaden vd., 2022), membran filtrasyonu (Neethu vd., 2018; Zhang vd., 2019), aktif karbon ile adsorpsiyon (Aftab vd., 2023; Ghaedi vd., 2014; Serban vd., 2023) gibi fiziksel yöntemler ve mikroorganizmaların kullanılmasıyla boyanın biyolojik olarak parçalanması gibi biyolojik yöntemler (Anene vd., 2023; Cheng vd., 2015; Ellafi, vd., 2023; Khan vd., 2022) kullanılmaktadır.

Atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları, hedeflenen kirleticilerin türüne ve mevcut kaynakların durumuna göre değişkenlik göstermektedir. Bahsedilen bu arıtma yöntemleri, organik ve inorganik kirleticilerin, asılı parçacıkların ve koloidal maddelerin giderilmesinde etkili olsalar da, maliyetli kimyasallar kullanma ihtiyacı doğurabilir ve toksik yan ürünler veya çamur üretebilirler. Yüksek verimli atık sulara uygulandıklarında genellikle güvenilir ve ekonomik olmaktan uzak olabilirler. Ayrıca, düşük seçicilikleri ve yenilenme zorlukları, bu yöntemleri özellikle boya giderimi için uygun hale getirmemektedir. Bununla birlikte, adsorpsiyon yöntemi, düşük maliyeti, çevre dostu oluşu, uygulama kolaylığı, tasarım esnekliği, ikincil kirliliğin olmaması ve yüksek yenilenme kapasitesi gibi özellikleri sayesinde atık sulardan boyaların giderilmesinde en etkili teknolojilerden biri olarak öne çıkmaktadır (Tan vd., 2023). Bu tekniğin performansı, kullanılan adsorbentin doğasına, maliyetine, bulunabilirliğine ve yenilenme potansiyeline bağlı olarak değişmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde adsorpsiyon tekniği ile Kongo kırmızısı gideriminde çevre dostu, bol, ekonomik ve yüksek adsorpsiyon performansına sahip etkili adsorbentlerin geliştirilmesi önem taşımaktadır. Mezogözenekli kalsiyum silikat malzemeler, yüksek yüzey alanı ve adsorpsiyon için uygun gözenek yapısı sayesinde boyaların adsorpsiyonunda adsorbent olarak kullanım potansiyeline sahip adsorbentler arasında yer almaktadır (Crini 2006). Literatürde Kongo kırmızısının sulardan adsorpsiyon yöntemi ile giderimi için çeşitli adsorbent malzemeler kullanılmasına rağmen mezogözenekli kalsiyum silikat malzemeler ile gerçekleştirilen sınırlı sayıda çalışmanın olduğu görülmüştür (Li vd., 2020; Zeidan vd.,2023, Zhang vd., 2023).

Bu çalışmada, kalsiyum kaynağı olarak kalsiyum nitrat kullanılarak kalsiyum silikat malzeme sentezlenmiş ve Kongo kırmızısı, Metilen mavisi ve Metil oranj gideriminde adsorbent olarak kullanılmıştır. Kongo kırmızısının kalsiyum silikat malzeme ile adsorpsiyonuna adsorpsiyon koşullarından adsorbent miktarı, pH, temas süresi ve başlangıç derişiminin etkisi incelenmiştir. Farklı kinetik ve

izoterm model eşitlikler kullanılarak adsorpsiyon kinetiği ve izoterm verilerinin model eşitliklere uyumu belirlenmiştir.

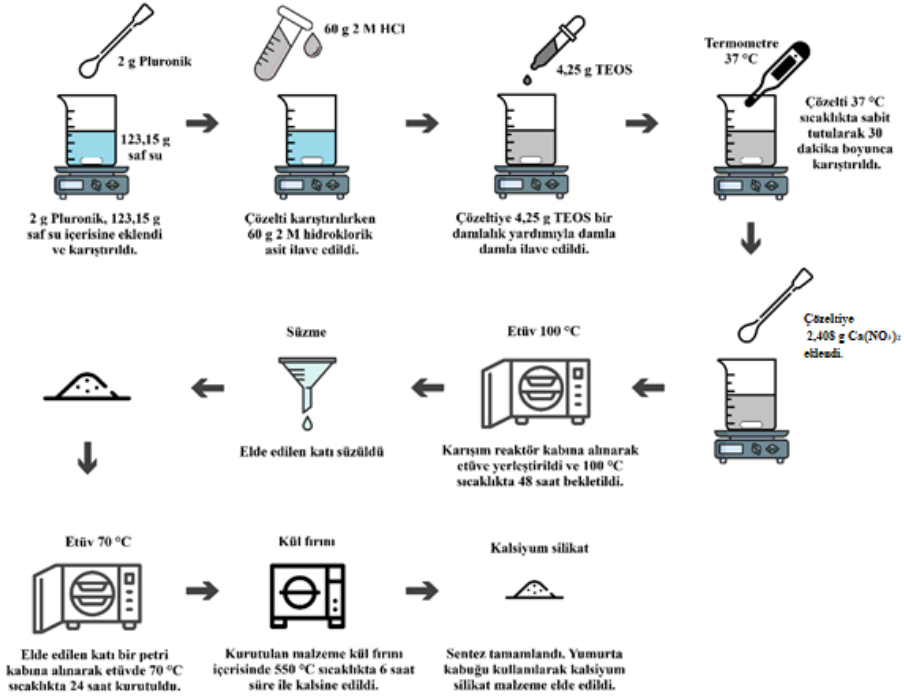
## **2. Malzeme Sentezi**

### **2.1. Malzeme ve kimyasallar**

Kalsiyum kaynağı olarak kalsiyum nitrat tetra hidrat (Sigma Aldrich), silika kaynağı olarak TEOS (tetraethylortosilicate; Merck), mezogözenek yapı oluşumunda şablon olarak Pluronik 123 (Sigma-Aldrich) kullanılmıştır. Boya olarak Kongo kırmızısı (Sigma Aldrich), Metil oranj (Sigma Aldrich) ve Metilen mavisi (Sigma Aldrich) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bütün çözeltiler ultra saf su ile hazırlanmıştır. Sentezde kullanılan bütün kimyasal maddeler herhangi bir saflaştırma yapılmadan kullanılmıştır.

### **2.2. Kalsiyum silikat sentezi**

2 g Pluronik 123, 15 g su içerisinde iyice çözüldükten sonra, karıştırma altında 60 g 2 M HCl eklenmiş, ardından 4,25 g TEOS sentez çözeltilisine damla damla ilave edilmiştir. Karışım 37 °C de 30 min süreyle karıştırılmış bu süre sonunda kalsiyum nitrat Ca/Si mol oranı 0,5 olacak şekilde ilave edilmiştir. Daha sonra karışım otoklav içerisinde alınarak 100 °C de 48 saat etüvde bekletilmiştir. Elde edilen katı süzülüş, 70 °C de 24 h kurutulmuş ve 550 °C de 6 saat süreyle kalsine edilmiştir. Elde edilen malzemelerin kurutulmasında Nüve FN 300 model etüv, kalsine edilmesinde ise Prometheus RMP-8 model kül fırını kullanılmıştır. Kalsiyum silikat adsorbent malzeme hazırlama süreci şematik olarak Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Mezogözenekli kalsiyum silikat hazırlama sürecinin şematik gösterimi.

### 2.3. Adsorpsiyon deneyleri

Kongo kırmızısı (KK), Metilen mavisi (MM) ve Metil oranj (MO) boya­ların sulu çözeltilerden giderimi, adsorpsiyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon çalışmaları, sürekli karıştırılmalı kesikli bir sistemde sabit karıştırma hızında (500 rpm) yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan çözeltiler, seçilen boyalardan hazırlanan 1000 mg L<sup>-1</sup> derişimli stok çözelti seyreltilerek hazırlanmıştır. Adsorpsiyonu etkileyen parametrelerden, adsorbent miktarı, pH ve temas süresi, gibi parametrelerin etkileri incelenmiştir. Adsorbent miktarının adsorpsiyon üzerine etkisini belirlemek için 20 mg/L derişimli çözeltiler kullanılarak, 0,25-2 g/L adsorbent miktarı aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir. pH'ın etkisi 4-10 aralığında, başlangıç derişimi etkisi 25 °C sıcaklıkta 5-200 mg/L derişimli çözeltiler ile gerçekleştirilmiştir. Temas süresinin adsorpsiyon üzerine etkisini belirlemek amacıyla, 20,718 ve 97,608 mg/L olmak üzere iki farklı Kongo kırmızısı derişimli çözeltiler ile 2 g/L adsorbent miktarında, pH 8, 298 K ve 0-480 dakika zaman aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda belirtilen deneysel koşullarda gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda çözeltilerde kalan kirletici miktarları PG Instruments TG 60 model UV-VIS

spektrometre cihazı ile belirlenmiştir. Adsorpsiyon kapasitesi ve adsorpsiyon %'sinin belirlenmesinde aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) * V}{m} \quad (1)$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) * V}{m} \quad (2)$$

$$\text{Adsorpsiyon (\%)} = \left( \frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) * 100 \quad (3)$$

Bu bağıntılardaki;

$q_e$  = Kalsiyum silikat adsorbentın denge adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)

$q_t$  = Kalsiyum silikat adsorbentın herhangi bir t anındaki adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)

$C_0$  = Boyar madde başlangıç derişimi (mg/L)

$C_e$  = Denge de çözeltide kalan boyar madde derişimi (mg/L)

V = Boyar madde çözeltisi hacmi (L)

m = Kalsiyum silikat adsorbent miktarı (g)

#### **2.4. Kalsiyum silikat adsorbentın sıfır yük noktasının belirlenmesi ( $pH_{pzc}$ )**

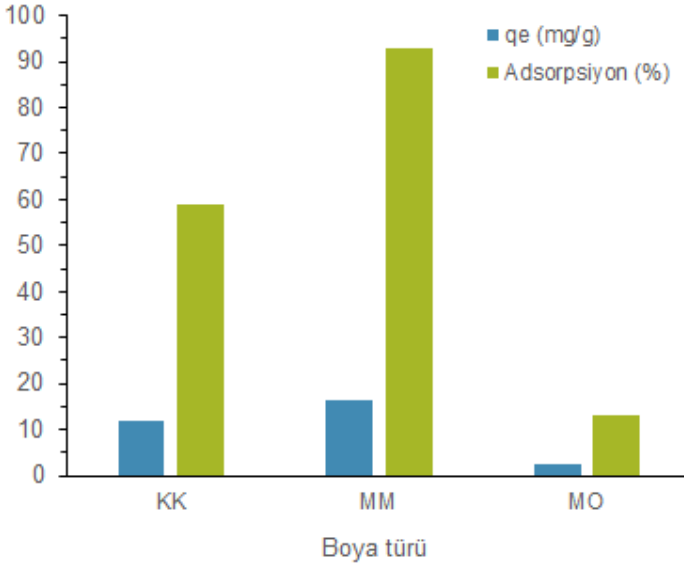
Kalsiyum silikat adsorbentın sıfır yük noktasını ( $pH_{pzc}$ ) belirlemek için tuz ekleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde 0,05 g örnek 20 mL 0,1 M NaCl çözeltisine eklenmiş ve başlangıç pH'sı ( $pH_i$ ) 2-12 aralığına HCl ve NaOH çözeltileri kullanılarak ayarlanmıştır. 25 °C de 24 saat çalkalamalı su banyosunda (Memmert WB 22 model) bekletildikten sonra karışımların son pH'sı ( $pH_s$ ), pH metre (Thermo Scientific, Orion 3 Star) kullanılarak ölçülmüştür. Adsorbentın sıfır yük noktası daha sonra  $\Delta pH$  ( $pH_s - pH_i$ )  $pH_i$ 'ye karşı grafiğe geçirilerek belirlenmiştir.

### **3. Bulgular ve Tartışma**

#### **3.1. Ön deneyler**

Kalsiyum silikat adsorbentın adsorpsiyon performansını değerlendirmek için, başlangıçta Metilen mavisi ( $C_0=17,748$  mg L<sup>-1</sup>), Kongo kırmızısı ( $C_0=20,351$  mg L<sup>-1</sup>) ve Metil oranj ( $C_0=20,852$  mg L<sup>-1</sup>) boyarları ile adsorpsiyon çalışmaları, 25 °C sıcaklık, orijinal çözelti pH'sı, 1 g L<sup>-1</sup> adsorbent miktarı ve 20 saat temas süresi koşullarında yürütülmüştür. Başlangıç gözlemleri, kalsiyum silikat adsorbentın Metil oranj dışında Metilen mavisi ve Kongo kırmızısı boyarlarını giderme

performansının yüksek olduğunu göstermiştir (Şekil 3). Ancak bu çalışma kapsamında Kongo kırmızısı ile yürütülen adsorpsiyon çalışmaları sunulmuştur.



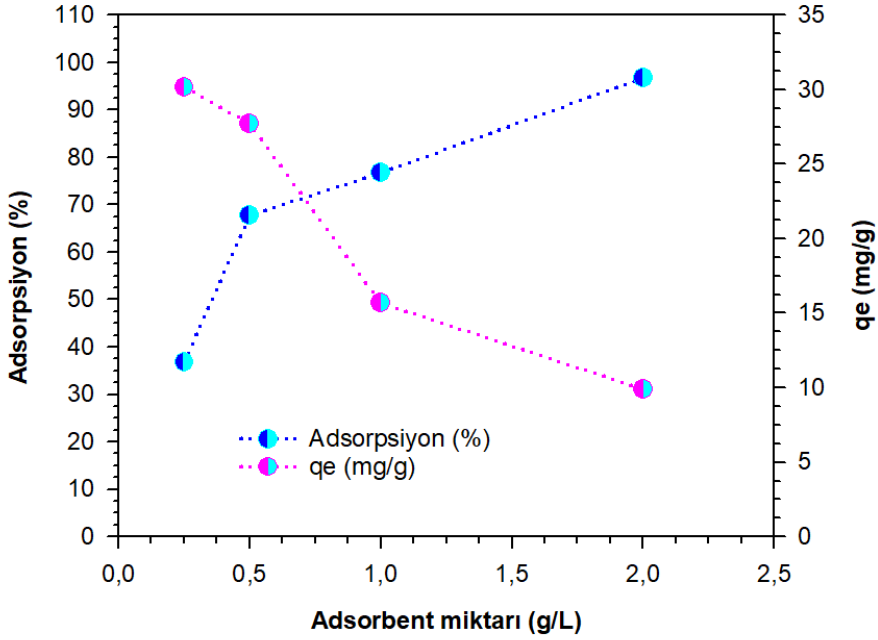
**Şekil 3.** Kongo kırmızısı (KK), Metilen mavisi (MM) ve Metil oranj (MO) boyaaların mezogökalsiyum silikat adsorbent ile adsorpsiyonu.

### 3.2. Adsorpsiyon sonuçları

#### 3.2.1. Adsorbent miktarının etkisi

Adsorbent miktarı, herhangi bir kirlenici başlangıç derişimi için adsorbentin giderim etkinliğini ve kapasitesini belirleyen önemli bir faktördür. Kalsiyum silikat adsorbenti kullanılarak gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmalarında Kongo kırmızısı adsorpsiyonuna adsorbent miktarının etkisi 0,25-2 g/L adsorbent miktarı aralığında, orijinal başlangıç çözeltili pH değerinde, 25 °C ve 20,448 mg/L Kongo kırmızısı başlangıç derişimi koşullarında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4’te gösterilmiştir. Adsorbent miktarının 0,25 g/L değerinden 0,5 g/L değerine artırılması ile adsorpsiyon veriminin %36,86 düzeyinden %67,77 düzeyine yükseldiği, 0,5 g/L değerinden 2 g/L değerine artırılması ile %96,80 düzeyine ulaştığı gözlenmiştir. Adsorbent miktarı ile adsorpsiyon kapasitesindeki değişim incelendiğinde adsorpsiyon kapasitesinin adsorbent miktarı ile azaldığı görülmüştür. Adsorbent miktarının artışı ile adsorpsiyon verimindeki artış, aynı miktardaki adsorbat molekülleri için daha fazla adsorpsiyon için elverişli sitelerin varlığı ile açıklanabilirken, yüksek adsorbent miktarında adsorpsiyon kapasitesinde gözlenen azalma, adsorbent miktarının artışı ile adsorpsiyon için

elverişli sitelerin bir kısmının kullanılmadan kalması ile açıklanabilir (Ahmad ve Ansari, 2021, Mandal vd., 2021). Adsorpsiyon verimindeki artış esas alınarak kinetik, pH ve izoterm çalışmaları 2,0 g/L adsorbent miktarında yürütülmüştür.

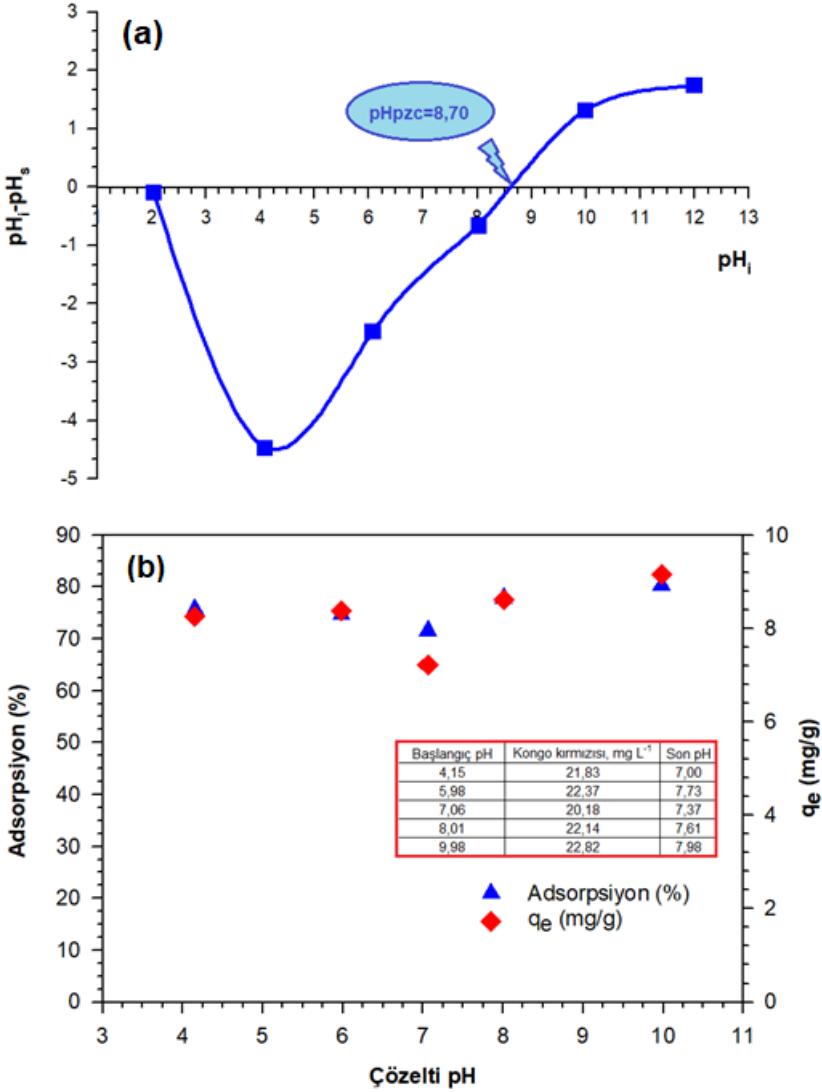


**Şekil 4.** Kongo kırmızısı adsorpsiyonuna adsorbent miktarının etkisi (Adsorpsiyon koşulları; orijinal çözelti pH, 20,448 mg L<sup>-1</sup> kongo kırmızısı, 25 °C, 20 saat).

### 3.2.2. Sıfır yük noktası ve pH etkisi

Adsorpsiyon sürecinde pH, adsorbentin yüzey yükünü ve Kongo kırmızısının çözeltideki iyonizasyon derecesini kontrol ederek önemli bir rol oynamaktadır. Çözeltinin pH'ının Kongo kırmızısının adsorpsiyonu üzerindeki etkisi, diğer parametreler sabit tutulurken pH 4 ile 10 arasındaki bir aralıkta değerlendirilmiştir ve bu etkiler Şekil 5'te gösterilmiştir. Kongo kırmızısı boyasının kalsiyum silikat adsorbent ile hem giderim verimi hem de adsorpsiyon kapasitesi değerlerinin her ikisinde de pH değişimi ile önemli olmayan azalma ve artışlar gözlenmiştir. pH 4'te % 75,71 olan giderim veriminin, pH 7 değerine artırılması ile % 71,63 değerine azaldığı ancak pH değerindeki daha fazla artışlar ile (pH 8 ve 10) giderim verimlerinin % 80,28 düzeyine ulaştığı gözlenmiştir. pH değişimi ile adsorpsiyon kapasitesi değerlerinde de giderim verimlerinde olduğu gibi önemli düzeyde olmayan artma ve azalmalar gözlenmiştir. pH 4'ten 6'ya yükseldiğinde adsorpsiyon kapasitesinin 8,264 mg/g değerinden 8,371 mg/g değerine önemsiz düzeyde arttığı, pH 7'ye artırıldığında 7,228 mg/g düzeyine

azaldığı ancak pH değerindeki daha fazla artışların (pH 8 ve 10) adsorpsiyon kapasitesinde sırasıyla 8,62 mg/g ve 9,16 mg/g değerlerine yükselmesine yol açmıştır (Şekil 5b).



**Şekil 5.** Kalsiyum silikat adsorbentinin (a) sıfır yük noktası (b) kongo kırmızısının adsorpsiyonuna pH etkisi (Adsorpsiyon koşulları; m/V: 2,0 g/L, 25 °C, 240 min).

pH'in Kongo kırmızısı adsorpsiyonu üzerindeki etkisi adsorbent yüzeyinin sıfır yük noktası ( $pH_{pzc}$ ) esas alınarak açıklanabilir. Kalsiyum silikat adsorbentinin  $pH_{pzc}$  değerinin 8,70 olduğu Şekil 5a'da gösterilmiştir. Adsorbentinin  $pH_{pzc}$ 'nin altında bir

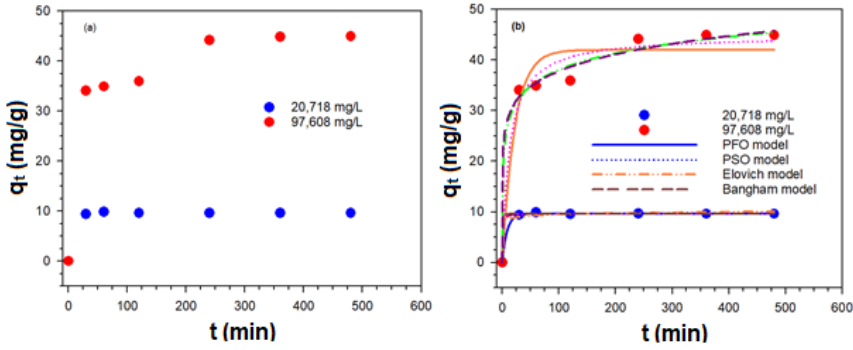
pH'da, yüzey grupları hidrojen iyonlarının adsorpsiyonu veya yüzey hidroksil grupları ile hidrojen iyonlarının reaksiyonu nedeniyle pozitif bir yük üretmektedir. Eğer boya çözeltilisinin pH'sı,  $pH_{pzc}$ 'den yüksekse, adsorbent yüzeyi negatif yüklenir ve çözeltiden iyonlar ara yüzey tabakasına çekilir. Ayrıca sulu çözeltilerde, adsorbentün yüklenmiş yüzeyleri ile boyaların yüklenmiş molekülleri arasında birçok elektrostatik etkileşim vardır. Çözünmüş Kongo kırmızısı molekülleri genellikle negatif yük taşıırken, Kongo kırmızısı yapısındaki  $-NH_2$  grupları protonlanabilir ve pozitif yük taşıyabilir (Ahmad ve Ansari, 2021). Mevcut durumda hem  $pH_{pzc}$ 'den düşük olan hem de yüksek olan pH değerlerinde adsorpsiyon verimi ve adsorpsiyon kapasitesi değerlerinde önemli değişimler gözlenmemesi adsorpsiyon sürecinde elektrostatik etkileşimlerin baskın olmadığına işaret etmektedir.

### 3.2.3. Adsorpsiyon kinetiği

Adsorpsiyon kinetiği adsorpsiyon kapasitesi ve etkileşim süresi arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için kullanılır. Kalsiyum silikat ile Kongo kırmızısı adsorpsiyon kinetiği 0-480 dakika arasında adsorbent miktarı, sıcaklık sabit tutularak iki farklı Kongo kırmızısı derişiminde incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir. Denge temas süresinin kirlenici derişimine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. 20,718 mg/L Kongo kırmızısı derişimi için denge temas süresi 120 dakika ve bu sürede elde edilen adsorpsiyon kapasitesi 9,591 mg/g iken 97,608 mg/L Kongo kırmızısı derişimi için denge temas süresi 240 dakika, adsorpsiyon kapasitesi 44,176 mg/g olarak belirlenmiştir. Her iki derişim için belirlenen denge temas süresinden sonra adsorpsiyon kapasitesinde önemli bir artış gözlenmemiş, 20,718 mg/L ve 97,608 mg/L Kongo kırmızısı derişimi için 480 dakika sonunda sırasıyla 9,614 mg/g ve 44,929 mg/g adsorpsiyon kapasitesi değerleri elde edilmiştir.

Adsorpsiyon kinetik verileri sözde birinci derece (PFO), sözde ikinci derece (PSO), Elovich ve Bangham model eşitlikleri ile değerlendirilmiştir (Nguyen vd., 2022; Zambrano-Intriago, vd., 2023). Model eşitlikler doğrusal olmayan regresyon analizi ile elde edilen model parametrelerinin değerleri ile birlikte Tablo 1'de verilmiştir. Deneysel veri setlerine en uygun model, en yüksek  $R^2$  ve en düşük  $\chi^2$  değerleri ile değerlendirildiğinde 20,718 mg/L Kongo kırmızısı derişimi için sırasıyla PFO, PSO, Bangham ve Elovich, 97,608 mg/L Kongo kırmızısı derişimi için ise sırasıyla Bangham, Elovich, PSO ve PFO olarak belirlenmiştir. Genel olarak, PFO ve PSO modellerinin hız sabitleri, 20,718 mg/L başlangıç Kongo kırmızısı derişiminde 97,608 mg/L'den daha yüksektir. Örneğin,  $C_0 = 20,718$  mg/L'de  $k_1$  ve  $k_2$  değerleri  $[0,121 \text{ min}^{-1}$  ve  $0,046 \text{ g mg}^{-1} \times \text{min}^{-1}]$ ,  $C_0 = 97,608$  mg/L'de ise  $[0,214 \text{ min}^{-1}$  ve  $0,002 \text{ g mg}^{-1} \times \text{min}^{-1}]$  bulunmuştur, Bu sonuçlar kalsiyum silikat adsorbentün daha düşük başlangıç derişimine sahip çözeltilerde Kongo kırmızısını daha hızlı adsorbe edebileceğini göstermektedir.





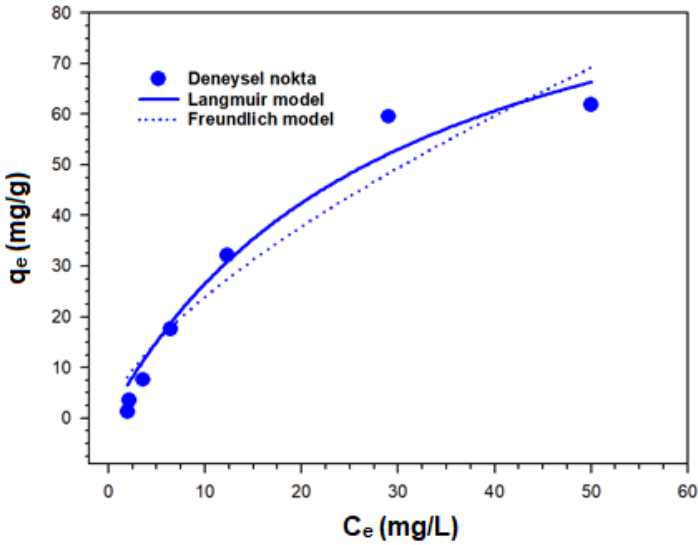
**Şekil 6.** Kongo kırmızısı adsorpsiyonuna  
 (a) temas süresinin etkisi (b) kinetik modellerin karşılaştırılması.  
 (Adsorpsiyon koşulları; m/V: 2,0 g/L, pH 8, 25 °C, 480 min).

**Tablo 1.** Kalsiyum silikat üzerine Kongo kırmızısı adsorpsiyonunun kinetik verilerinin modellenmesinde kullanılan kinetik modellerin parametreleri.

Kinetik Model	Parametre (Birim)	Başlangıç Kongo Kırmızısı derişimi	
		20,718 mg/L	97,608 mg/L
<b>qe, deneysel (mg g<sup>-1</sup>)</b>		9,591	44,176
<b>Pseudo-first-order (PFO)</b>			
$q_t = q_1(1 - e^{-k_1 t})$	$q_1$ (mg g <sup>-1</sup> )	9,662	41,97
	$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	0,121	0,046
	R <sup>2</sup>	0,999	0,945
	$\chi^2$	0,059	82,97
<b>Pseudo-second-order (PSO)</b>			
$q_t = \frac{k_2 q_2^2 t}{1 + k_2 q_2 t}$	$q_2$ (mg g <sup>-1</sup> )	9,670	44,94
	$k_2$ (g mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	0,214	0,002
	R <sup>2</sup>	0,999	0,974
	$\chi^2$	0,100	38,68
<b>Elovich model</b>			
$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta \alpha t)$	$\alpha$ (mg g <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	2,1x10 <sup>8</sup>	162,4
	$\beta$ (g mg <sup>-1</sup> )	2,607	0,214
	R <sup>2</sup>	0,989	0,989
	$\chi^2$	0,877	17,04
<b>Bangham model</b>			
$q_t = k_B t^{\alpha_B}$	$k_p$ (mg g <sup>-1</sup> min <sup>-<math>\alpha_B</math>)</sup>	9,514	21,62
	C	0,0022	0,121
	R <sup>2</sup>	0,999	0,990
	$\chi^2$	0,113	15,38

### 3.2.4. Başlangıç derişiminin etkisi ve adsorpsiyon izotermi

Adsorpsiyon izoterm deneyleri sonucunda elde edilen veriler Langmuir ve Freundlich modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Model eşitlikler (Nguyen vd., 2022) ve doğrusal olmayan regresyon analizi ile elde edilen Langmuir ve Freundlich izoterm modellerinin parametreleri Tablo 2’de özetlenmiş ve Şekil 7’de gösterilmiştir. Her iki model arasında yapılan karşılaştırmalarda, Langmuir izoterm modelinin, deneysel izoterm verileri ile daha uyumlu ve modelden elde edilen maksimum adsorpsiyon kapasitesinin ( $q_m$ ) 106,094 mg g<sup>-1</sup> olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kalsiyum silikat üzerinde Kongo kırmızısının adsorpsiyon sürecinin tek tabakalı olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Kalsiyum silikat üzerine Kongo kırmızısı adsorpsiyonu için adsorpsiyon izotermi (Deneysel koşullar:  $C_o = 5-400$  mg/L;  $t = 240$  min;  $m/V = 2,0$  g/L; pH ~ 8).

**Tablo 2.** Kalsiyum silikat üzerine Kongo kırmızısı adsorpsiyonunun deneysel izoterm verilerinin modellenmesi için kullanılan adsorpsiyon modellerinin parametreleri.

Model	Parametre (Birim)	Değer
<b>1. Langmuir model</b>		
$q_e = \frac{C_e q_m K_L}{1 + C_e K_L}$	$q_m$ (mg/g)	106,094
	$K_L$ (L/mg)	0,0334
	$R^2$	0,967
	$\chi^2$	130,36
<b>2. Freundlich model</b>		
$q_e = K_F C_e^n$	$K_F$ (mg/g)/(mg/L) <sup>n</sup>	5,25
	$n$	0,659
	$R^2$	0,925
	$\chi^2$	296,34

Kongo kırmızısı adsorpsiyonunda kullanılan çeşitli adsorbentlerin adsorpsiyon özellikleri Tablo 3'te özetlenmiştir. Sonuçlar kalsiyum silikat adsorbentin Kongo kırmızısına karşı yüksek bir adsorpsiyon performansı sergilediğini ve Tablo 3'te verilen çoğu adsorbentten daha yüksek adsorpsiyon performansına sahip olduğunu göstermektedir. Tablo 3'te verilen veriler aynı zamanda Kongo kırmızısı adsorpsiyonunun daha çok Langmuir adsorpsiyon izotermi ve pseudo second order kinetik model ile tanımlanabileceğini de göstermektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler ve Tablo 3'te verilen veriler değerlendirildiğinde kalsiyum silikat malzemenin atık sulardan Kongo kırmızısı giderilmesinde etkin bir adsorbent olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

**Tablo 3.** Kongo kırmızısı adsorpsiyonunda kullanılan farklı adsorbentlerin adsorpsiyon özelliklerinin karşılaştırılması.

Adsorbentler	pH	Derişim aralığı (mg L <sup>-1</sup> )	Adsorbent miktarı (g L <sup>-1</sup> )	İzoterm	Maksimum Adsorpsiyon Kapasitesi (mg/g)	Kinetik	Kaynak
Amin ile fonksiyonelleştirilmiş-SBA-15	8,8	100-500	1	Langmuir	186,41	PSO	Zeidan vd., 2023
Magnetik-SiO <sub>2</sub>	6	50-800	0,25	Langmuir	135,95	PSO	Zhang vd. 2023
Kalsiyum aljinat	6	50-400	5	Langmuir	64,02	PSO	Vairavel vd., 2017
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @mTiO <sub>2</sub> @GO	6	20-120	1	Freundlich	89,95	PSO	Li vd., 2014
Amin ile fonksiyonelleştirilmiş magnezyum ferrit (MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -NH <sub>2</sub> )	8	30-300	2,8	Langmuir	71,40	PSO	Aoopngan vd., 2019
Mezogözenekli kalsiyum silikat	8	5-200	2	Langmuir	106,09	PSO	<b>Bu çalışma</b>

#### 4. Sonuçlar

Kalsiyum silikat adsorbentin boyar madde giderim performansı Metilen mavisi > Kongo kırmızı > Metil oranj şeklinde elde edilmiştir. Adsorbent miktarının artırılması ile Kongo kırmızısının adsorpsiyon verimi %96,8'e kadar artmış, adsorpsiyon kapasitesi ise azalmıştır. pH değişimi ile adsorpsiyon kapasitesi değerlerinde önemli düzeyde bir değişim gözlenmemiştir. Kongo kırmızısı için maksimum adsorpsiyon kapasitesi ( $q_m$ ) 106,094 mg g<sup>-1</sup> olarak belirlenmiş ve elde edilen bulgular kalsiyum silikat malzemelerin atık sulardan boyar maddelerin gideriminde rekabetçi bir adsorbent olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

## Kaynaklar

- Ahmad, R., & Ansari, K. (2021). Comparative study for adsorption of congo red and methylene blue dye on chitosan modified hybrid nanocomposite. *Process Biochemistry*, 108, 90-102.
- Ahmed, H. M., Fawzy, M. E., & Nassar, H. F. (2022). Effective chemical coagulation treatment process for cationic and anionic dyes degradation. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(8), 299-307.
- Aftab, R. A., Zaidi, S., Khan, A. A. P., Usman, M. A., Khan, A. Y., Chani, M. T. S., & Asiri, A. M. (2023). Removal of congo red from water by adsorption onto activated carbon derived from waste black cardamom peels and machine learning modeling. *Alexandria Engineering Journal*, 71, 355-369.
- Akti, F., Tomul, F. (2024). Fabrication of Ag/Zr-SBA-15 materials in presence of tannic acid and their use in removal of organic pollutants from wastewater. *Materials Chemistry and Physics*. 326, 129817.
- Anene, C. E., Oguzie, K. L., Ogbulie, T. E., Akalezi, C. O., & Oguzie, E. E. (2023). Electrochemical and microbial decolourization of Congo Red dye-contaminated wastewater: experimental and computational studies. *Chemical Papers*, 77(12), 7761-7774.
- Aoopngan, C., Nonkumwong, J., Phumying, S., Promjantuek, W., Maensiri, S., Noisa, P., & Srisombat, L. (2019). Amine-functionalized and hydroxyl-functionalized magnesium ferrite nanoparticles for Congo red adsorption. *ACS Applied Nano Materials*, 2(8), 5329-5341.
- Castro, C. S., Guerreiro, M. C., Oliveira, L. C., Gonçalves, M., Anastacio, A. S., & Nazzarro, M. (2009). Iron oxide dispersed over activated carbon: support influence on the oxidation of the model molecule methylene blue. *Applied Catalysis A: General*, 367(1-2), 53-58.
- Cheng, M., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Wei, Z., Li, N., ... & He, X. (2015). Combined biological removal of methylene blue from aqueous solutions using rice straw and *Phanerochaete chrysosporium*. *Applied microbiology and biotechnology*, 99, 5247-5256.
- Crini, G. 2006, Haziran. "Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review". *Bioresource Technology*.
- El-Habacha, M., Lagdali, S., Dabagh, A., Mahmoudy, G., Assouani, A., Benjelloun, M., & Zerbet, M. (2024). High efficiency of treated-phengite clay by sodium hydroxide for the Congo red dye adsorption: optimization, cost estimation, and mechanism study. *Environmental Research*, 259, 119542.

- Ellafi, A., Dali, A., Mnif, S., & Ben Younes, S. (2023). Microbial Enzymatic Degradation, Spectral Analysis and Phytotoxicity Assessment of Congo Red Removal By *Bacillus* spp. *Catalysis Letters*, 153(12), 3620-3633.
- Ghaedi, M., Nasab, A. G., Khodadoust, S., Rajabi, M., & Azizian, S. (2014). Application of activated carbon as adsorbents for efficient removal of methylene blue: Kinetics and equilibrium study. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 2317-2324.
- Goudjil, S., Guergazi, S., Masmoudi, T., & Achour, S. (2021). Effect of reactional parameters on the elimination of Congo Red by the combination of coagulation–flocculation with aluminum sulfate. *Desalin. Water Treat*, 209, 429-436.
- Haq, E., Jun, J. W., & Jhung, S. H. (2011). Adsorptive removal of methyl orange and methylene blue from aqueous solution with a metal-organic framework material, iron terephthalate (MOF-235). *Journal of Hazardous materials*, 185(1), 507-511.
- Ihaddaden, S., Aberkane, D., Boukerroui, A., & Robert, D. (2022). Removal of methylene blue (basic dye) by coagulation-flocculation with biomaterials (bentonite and *Opuntia ficus indica*). *Journal of water process engineering*, 49, 102952.
- Khan, A. U., Zahoor, M., Rehman, M. U., Shah, A. B., Zekker, I., Khan, F. A., ... & Mohamed, H. R. (2022). Biological mineralization of methyl orange by *Pseudomonas aeruginosa*. *Water*, 14(10), 1551.
- Li, J., Zhang, J., Wu, X., Zhao, J., Wu, M., & Huan, W. (2020). A nanocomposite paper comprising calcium silicate hydrate nanosheets and cellulose nanofibers for high-performance water purification. *RSC advances*, 10(51), 30304-30313.
- Li, L., Li, X., Duan, H., Wang, X., & Luo, C. (2014). Removal of Congo Red by magnetic mesoporous titanium dioxide–graphene oxide core–shell microspheres for water purification. *Dalton Transactions*, 43(22), 8431-8438.
- Ma, P., Han, C., He, Q., Miao, Z., Gao, M., Wan, K., & Xu, E. (2023). Oxidation of Congo red by Fenton coupled with micro and nanobubbles. *Environmental Technology*, 44(17), 2539-2548.
- Mandal, S., Calderon, J., Marpu, S. B., Omary, M. A., & Shi, S. Q. (2021). Mesoporous activated carbon as a green adsorbent for the removal of heavy metals and Congo red: Characterization, adsorption kinetics, and isotherm studies. *Journal of Contaminant Hydrology*, 243, 103869.

- Nguyen, L. M., Nguyen, N. T. T., Nguyen, T. T. T., Nguyen, D. H., Nguyen, D. T. C., & Van Tran, T. (2022). Facile synthesis of CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@ MIL-53 (Al) nanocomposite for fast dye removal: adsorption models, optimization and recyclability. *Environmental Research*, 215, 114269.
- Serban, G. V., Iancu, V. I., Dinu, C., Tenea, A., Vasilache, N., Cristea, I., ... & Chiriac, F. L. (2023). Removal efficiency and adsorption kinetics of methyl orange from wastewater by commercial activated carbon. *Sustainability*, 15(17), 12939.
- Siddiqui, S. I., Allehyani, E. S., Al-Harbi, S. A., Hasan, Z., Abomuti, M. A., Rajor, H. K., Oh, S. 2023, Mart 1. "Investigation of Congo Red Toxicity towards Different Living Organisms: A Review". Processes. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- Tan, Y., Huang, W., Lei, Q., Huang, S., Yang, K., Chen, X., & Li, D. (2023). Insight into the adsorption of magnetic microspheres with large mesopores: tailoring mesoporous structure and ethylenediamine functionalization for ultrahigh Congo red removal. *Separation and Purification Technology*, 311, 123265.
- Vairavel, P., & Murty, V. R. (2017). Optimization, kinetics, equilibrium isotherms, and thermodynamics studies for Congo red dye adsorption using calcium alginate beads immobilized with dual adsorbent (*Neurospora crassa* dead fungal biomass and wheat bran). *Desalination and Water Treatment*, 97, 338-362.
- Zambrano-Intriago, L. A., Daza-López, E. V., Fernández-Andrade, A., Luque, R., Amorim, C. G., Araújo, A. N., & Montenegro, M. C. (2023). Application of a novel hybrid MIL-53 (Al)@ rice husk for the adsorption of glyphosate in water: Characteristics and mechanism of the process. *Chemosphere*, 327, 138457.
- Zeidan, H., Can, M., & Marti, M. E. (2023). Synthesis, characterization, and use of an amine-functionalized mesoporous silica SBA-15 for the removal of Congo Red from aqueous media. *Research on Chemical Intermediates*, 49(1), 221-240.
- Zhang, Y., Yu, W., Li, R., Xu, Y., Shen, L., Lin, H., & Wu, G. (2019). Novel conductive membranes breaking through the selectivity-permeability trade-off for Congo red removal. *Separation and Purification Technology*, 211, 368-376.
- Zhang, L., Lu, C., Dong, X., & Yang, H. (2023). Iron tailings derived core-shell magnetic mesoporous silica microspheres for effective Congo red removal. *Journal of Porous Materials*, 30(5), 1709-1724.

## **8. Bölüm**

### **Bilgisayarlı Tomografi ve Dikkat Edilmesi Gereken Konu: Tüp Voltajı**

**Güneş AÇIKGÖZ<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi  
ORCID: 0000-0001-9118-3153



## GİRİŞ

Günümüzde yaygın olarak kullanılan ve modern olarak kesitsel yöntemlerin ilki olan Bilgisayarlı Tomografi (BT), 1970'lerin başlarında İngiltere'de G. N. Hounsfield tarafından geliştirildi ve beynin görüntülenmesinde kullanıldı (Cunningham ve Judy; 2000).

BT taraması esnasında X-ışını kullanılır. Kullanılan ışın dizisi belirli bir vücut parçasının etrafında döndürülür ve kesitsel görüntüler elde edilir. Elde edilen tomografik görüntülerin, belirli bir alan hakkında ayrıntılı bilgi içermeleri ve görüntülerin üst üste binmesinin (süperpozisyon) ortadan kalkması gibi avantajlar sağlamaktadır (Patel ve De Jesus, 2024).

BT incelemelerinde X ışını kullanılmaktadır ve X ışınları, 0,01 ila 10 nanometre arasında değişen dalga boylarına sahip iyonize bir radyasyon türüdür. Bu nedenle artan BT incelemelerinden dolayı hastaların aldığı radyasyon dozu gittikçe dikkat çeken bir konu haline gelmeye başladı. Radyasyonun kanserojen etkisi gibi etkilerine ilişkin birincil veriler yapılan epidemiyolojik çalışmalara dayanmaktadır. Hiroşima ve Nagazaki'ye atılan atom bombalarının ardından, radyasyon kaynaklı malignite riskinin bir ekstrapolasyonu yapıldı (Bos ve ark., 2023). Çoğu atom bombasından kurtulanları ve daha az ölçüde radyoterapi gören hastaları kapsayan bu çalışmalar, maruz kalınan radyasyon dozunun miktarına bağlı olarak kanser riskini artırdığını göstermektedir (Ron, 1998). Ancak, birden fazla faktör (örneğin, yaş, kilo vb.) kanser gelişimine katkıda bulunduğu bilinmektedir. Çocukların ve ergenlerin hematopoietik sistemi ve içi boş ve katı organları, yetişkinlere kıyasla iyonlaştırıcı radyasyona karşı daha hassastır (Bos ve ark., 2023; Erdem ve ark., 2022)).

Radyasyonun canlı hücredeki hasarı moleküler seviyede gerçekleşir. Bu hasar doğrudan ve dolaylı olarak meydana gelmektedir. Tiroid, meme ve akciğer kanserleri ve lösemi için risk tahminleri oldukça kesindir ve nispeten düşük dozlarda (<0,2 Gy) ilişkiler bulunmuştur. Radyasyon ile tükürük bezleri, mide, kolon, mesane, yumurtalık, merkezi sinir sistemi ve cilt kanserleri arasındaki ilişkiler de bildirilmiştir, ancak ilişkiler iyi bir şekilde ölçülmemiştir (Ron, 1998; Küçük ve ark., 2022).

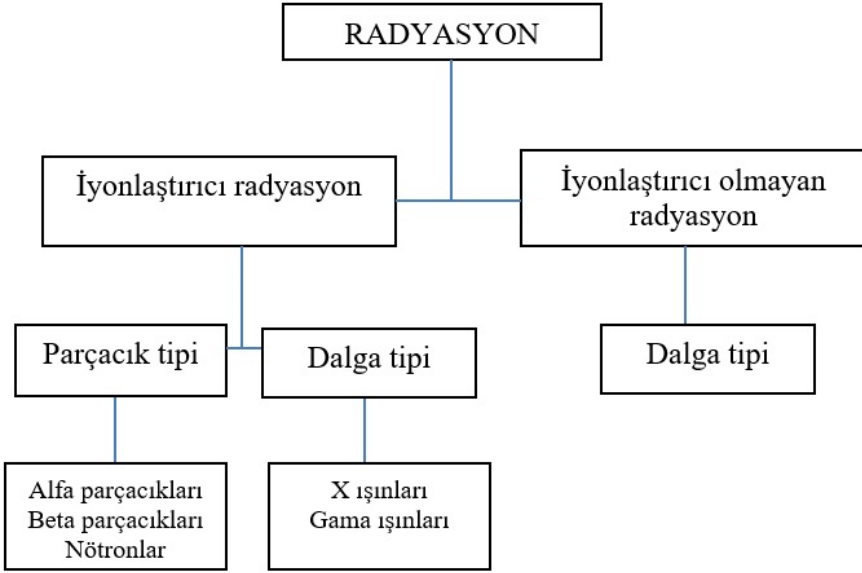
İyonize radyasyonun bilinen zararlı etkilerine ilişkin artan farkındalık, BT taramalarının radyasyon dozlarını "makul ölçüde elde edilebilecek kadar düşük" (ALARA) ilkesine göre gerekçelendirilmesine ve optimize edilmesine neden oldu (Huda ve ark., 2002).

## Radyasyon Türleri

Radyasyon, bir kaynaktan yayılan elektromanyetik enerjidir. Radyasyon, iyonlaştırıcı olmayan ve iyonlaştırıcı radyasyon olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 1). Bir maddeyi oluşturan atomları iyonlaştırma (atomları pozitif yüklü iyonlara ve negatif yüklü elektronlara ayırma) yeteneğine sahip olan iyonlaştırıcı radyasyon, parçacık ışınları ve elektromanyetik dalgalar olarak ikiye ayrılır.

$\alpha$  (alfa) parçacıkları,  $\beta$  (beta) parçacıkları, nötronlar vb. parçacık türü radyasyonlardır. Parçacık ışınları yüklü (iyonize) parçacıkları ve yüksüz parçacıkları içerir.  $\gamma$  (gama) ışınları ve X ışınları dalga türü radyasyonlardır (Moe, 2024).

Elektrik dalgaları, kızılötesi ışınlar ve görünür ışınlar gibi bazı elektromanyetik dalga biçimleri iyonlaşmaya neden olmaz ve bunlara iyonlaştırıcı olmayan radyasyon denir. Ultraviyole ışınlar genellikle iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak sınıflandırılır, ancak bazı ultraviyole ışınları iyonlaşmaya neden olur. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, iyonlaştırıcı radyasyondan daha az güçlüdür ve bu nedenle yalnızca bir molekül içindeki atomları hareket ettirmek veya titreştirmek için yeterli enerji içerir (Erdem ve ark., 2024a; 2024b).



Şekil 1. Radyasyon türleri

Her biri farklı özelliklere sahip iyonlaştırıcı radyasyon türleri bulunmaktadır. X ışımından farklı olarak bilinen iyonlaştırıcı radyasyon türleri şunlardır:

Alfa radyasyonu, uranyum ve radyum gibi elementlerin atomları tarafından yayılan ağır, pozitif yüklü parçacıklardan oluşur. Alfa radyasyonu bir kağıt parçası veya cildimizin ince yüzey tabakası (epidermis) tarafından tamamen durdurulabilir. Ancak, alfa yayan maddeler nefes alma, yeme veya içme yoluyla vücuda alınırsa, doğrudan iç dokuları açığa çıkarabilir ve bu nedenle biyolojik hasara neden olabilir.

Beta radyasyonu elektronlardan oluşur. Alfa parçacıklarından daha nüfuz edicidirler ve 1-2 santimetre sudan geçebilirler. Genellikle, birkaç milimetre kalınlığında bir alüminyum levha beta radyasyonunu durduracaktır.

Gama ışınları, X ışınlarına, ışığa ve radyo dalgalarına benzer elektromanyetik radyasyondur. Gama ışınları, enerjilerine bağlı olarak insan vücudundan geçebilir, ancak kalın beton veya kurşun duvarlar tarafından durdurulabilir.

Nötronlar yüksüz parçacıklardır ve doğrudan iyonlaşma üretmezler. Ancak, maddenin atomlarıyla etkileşimleri alfa, beta, gama veya X ışınlarına yol açabilir ve bunlar da iyonlaşma üretir. Nötronlar nüfuz edicidir ve yalnızca kalın beton, su veya parafin kütleleri tarafından durdurulabilirler (IAEA, 2024).

İyonlaştırıcı radyasyon bir hücrenin çekirdeğinden geçtiğinde genetik materyale radyasyon hasarı doğrudan veya dolaylı olarak meydana gelebilir. Doğrudan hasar meydana gelmesi için radyasyonun genetik materyale çarpması gerekir. Hassas materyalin hacmi, hücrenin ve çevresindeki dokunun toplam hacmiyle karşılaştırıldığında çok küçük olduğundan, bunun gerçekleşme olasılığı uzaktır. Radyasyon genetik materyale yakın bir mesafede etkileşime girerse, etkileşim DNA'ya zarar verebilecek kadar yakına sürüklenebilen serbest bir radikal yaratabilir. Etkileşime giren bu radyasyon türlerinin büyük çoğunluğu iyonlaşma ve sonrasında serbest radikaller üretir. Bu serbest radikaller genellikle biyolojik bir etki olmadan mikro saniyeler içinde yeniden birleşir. Yeniden birleşmeler bile, hücrenin yalnızca çok küçük bir bölümünün genetik materyal tarafından temsil edildiği ve serbest radikallerin yayılma mesafesinin çok kısa olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, çoğu serbest radikal genetik materyalle etkileşime giremez. Dahası, elektromanyetik radyasyonun hücre veya içindekilerle etkileşime girmeden hücreden geçmesi yaygındır (IOM, 1995).

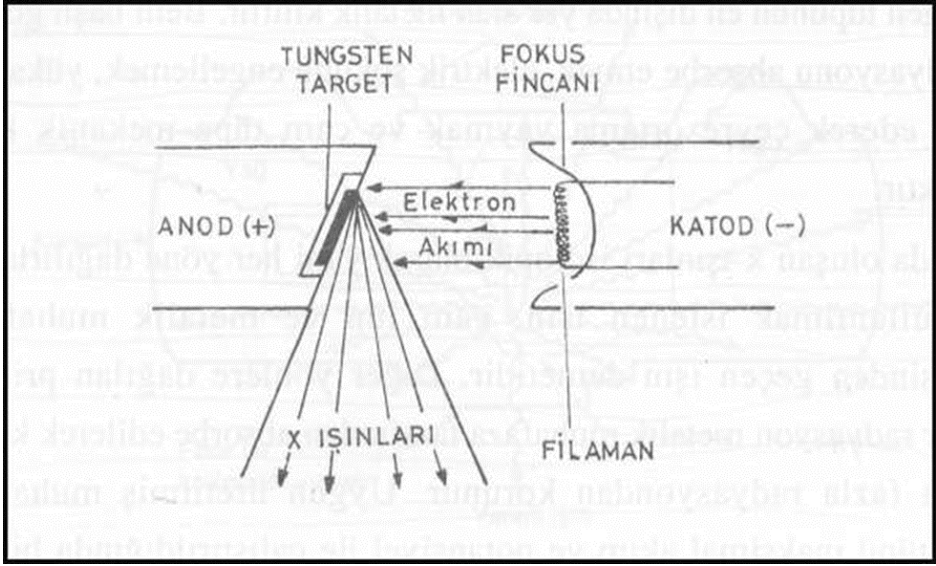
### **X Işının Oluşumu**

X ışınının oluşumu genel tanımıyla, elektronların bir potansiyel farkı altında hızlandırılarak elektromanyetik radyasyona dönüşmesi olayı olarak ifade edilmektedir. X ışını oluşumunda, elektrik enerjisinin yalnızca %1'i x-ışınına dönüştürülür ve kalan %99'u x-ışını tüpü tertibatında ısıya dönüştürülür. Bu

nedenle, tanısal görüntüleme için yeterli x-ışını çıkışı üretmek için x-ışını tüpü önemli bir ısı yüküne dayanmalı ve bunu dağıtmalıdır; bu da x-ışını tüpünün tasarımını ve bileşimini etkileyen bir gerekliliktir (Zink, 1997).

X ışını tüpü ve jeneratör x ışını oluşumunun temel bileşenleridir. Başlıca x-ışını tüpü bileşenleri ise katot ve birbirinden kısa bir mesafede ayrılmış bir anot, tüp zarfı, rotor ve stator (dönen anot sistemleri için) ve tüp muhafazasıdır (Tafti ve Maani, 2023). X-ışını üretiminde, elektrotlar arasında elektriksel iletimi sağlamak için x-ışını tüpünün boşaltılmış ortamında serbest elektronların bulunmasını gerektirir. Elektron demeti yayıcı, metal bir odaklama kabında (katot kabı) işlenmiş bir yuvaya merkezi olarak yerleştirilmiş katot filamentinden oluşur. Katot filamentinin etkinleştirilmesi, elektrik direnci nedeniyle katot filamentinin yoğun bir şekilde ısınmasına neden olur. Filamentin ısınması ile termiyonik emisyon olayı meydana gelir ve bu olay elektronların salınmasına yol açar. Salınan elektronlar, filament yüzeyinde bir elektron bulutu oluşturur ve itme kuvvetleri elektronların bu negatif yüklü buluttan dışarı atılmasını önler. Elektron bulutu dağılımı, çevredeki negatif yüklü odaklama kabı tarafından dengede tutulur. X-ışını jeneratörü tarafından hem katoda hem de anoda yüksek voltaj uygulandığında, elektronlar derhal filament ve odaklama kabı geometrisi tarafından belirlenen bir yol boyunca elektriksel olarak pozitif anoda hızlandırılır. Yüksek kinetik enerjili elektronlar x-ışını tüpünün anoduyla etkileşime girdiğinde X-ışını üretim sürecini başlar (Şekil 2). 74 proton bulunan tungsten, x ışını tüplerinde kullanılan anot hedefidir (McCollough, 1997; Seibert, 2004; Tafti ve Maani, 2023).

Elektron sayısı miliamper (mA) birimleri biçiminde ölçülür; burada 1 miliamper,  $6,24 \times 10^{15}$  elektron/s'ye eşittir. Elektron kinetik enerjisi (keV olarak ölçülür), uygulanan voltaja bağlıdır. Tüp voltajı, tüp akımı ve pozlama süresi (saniye olarak ölçülür) kullanıcı tarafından ayarlanabilir.



Şekil 2. X ışını oluşumu (Kaya ve ark., 1997).

### Bilgisayarlı Tomografinin Gelişimi

Sir Godfrey Newbold Hounsfield (28 Ağustos 1919- 12 Ağustos 2004), bilgisayarlı aksel tomografi tarayıcısı olan CAT taramasını geliştirme çalışmalarıyla 1979'da Allan McLeod Cormack ile birlikte Fizyoloji veya Tıp dalında Nobel Ödülü'nü kazandı. Canlı bir beynin ilk detaylı resmi 1971'de bir BT tarayıcısı tarafından çekildi (Şekil 3). BT, bilgisayarlı tomografi anlamına gelir. Bir tür X-ışını makinesi olan BT tarayıcıları, 20. yüzyılın sonlarında hastanelerde tanı için önemli hale geldi. Prototip CAT tarayıcısı yalnızca başı incelemek için tasarlanmıştı (Şekil 4). Günümüzün makineleri, bir hasta hareket eden bir masada yatarken, bir X-ışını tüpü ve vücudun etrafında dönen birden fazla dedektörle tüm vücudu tarayabilmektedir.



**Şekil 3.** İlk beyin BT görüntüsü (Shultz ve ark., 2021).



**Şekil 4.** Prototip CAT (Computed axial tomography) tarayıcısı (Anonim, 2024).

Projeksiyon verileri, tarama yapılandırması, tarama hareketleri ve dedektör düzenlemesine bağlı olarak aşağıda açıklanan birkaç olası geometriden birinde edinilebilir. Bu geometrilerin evrimi "nesil" olarak tanımlanır. Modern BT cihazlarının gelişimine kadar tarayıcı geometrisine bağlı olarak sınıflandırma beş nesile ayrılır.

### *Birinci Nesil: Paralel-Işın Geometrisi*

Paralel ışın geometrisi teknik olarak en basit olanıdır ve önemli BT prensiplerini anlamının en kolay yoludur. Birinci nesil BT sistemlerinde (Şekil 5a), nesneye doğru yönelen tek bir X-ışını kaynağı (kalem ışını) ve tek bir dedektör bulunur. Hem X-ışını kaynağı hem de dedektör, tarama düzleminde aynı anda döner. Bu işlem, belirli sayıda açılal dönüş için tekrarlanır. Bu sistemlerin avantajları basitlik, iyi görüntü-görüntü dedektör eşleşmesi, tarama parametrelerinin seçiminde esneklik (çözünürlük ve kontrast gibi) ve çok çeşitli farklı nesne boyutlarına uyum sağlama yeteneğidir. Dezavantajı ise ortalama tarama süresinin 25-30 dakika civarında olması yani uzun tarama süresidir.

### *İkinci Nesil: Çoklu Dedektörler, Yelpaze Işın (fan beam)*

İkinci nesil BT sistemlerinde (Şekil 5b), birinci nesille aynı çeviri/döndürme (translate/rotate) tarama geometrisini kullanılır. Fakat birinci nesil BT sistemlerinden farklı olarak yelpaze şeklinde ışın tipi ve birden fazla dedektörün kullanılmasıdır. Bu nedenle, her dönme sırasında bir dizi görüntü elde edilebilir ve bu da buna bağlı olarak daha kısa tarama sürelerine yol açar. Bu nedenle, geniş aralıklı boyutlardaki nesnelere ikinci nesil tarayıcılarla kolayca taranabilir.

### *Üçüncü Nesil: Döner Dedektörler, Yelpaze Işın (fan beam)*

Üçüncü nesil tarayıcılar 1976 yılında tanıtıldı. Üçüncü nesil BT sistemleri (Şekil 5c) yalnızca döndürme/tarama geometrisi kullanır. Bir yelpaze şeklinde X-ışını demeti izomerkez etrafında 360 derece döndürülür. Üçüncü nesil BT sistemlerinde ortalama bir tarama süresi yaklaşık olarak 5 saniyedir ve dedektör dizisinde daha fazla sensör dahil edilmiştir. Üçüncü nesil tasarımlar, dizideki her dedektör arasına ince tungsten plakalarının yerleştirilebilmesi ve saçılan radyasyonu reddetmek için X-ışını kaynağına odaklanabilmesi avantajına sahiptir.

### *Dördüncü Nesil: Sabit Dedektörler, Yelpaze Işın (fan beam)*

Dördüncü nesil BT sistemlerinde (Şekil 5d) yalnızca döndürme/tarama hareketi kullanır. Burada sistem, birden fazla dedektör ve taranan nesnenin etrafında dönen tek bir X-ışını kaynağı (fan ışını) içeren sabit bir halkadan oluşur. X-ışını kaynağı ve fan ışını izomerkez etrafında dönerken, dedektör dizisi sabit kalır. Görünüm sayısı dedektör sayısına eşittir. Bu tarayıcılar saçılmış radyasyona karşı daha hassastır. Hem üçüncü hem de dördüncü nesil sistemler ticari olarak mevcuttur. Genel olarak üstün bir tasarım olarak kabul edilmeseler bile her ikisi de klinik olarak oldukça başarılı olmuştur.

### *Beşinci Nesil: Taramalı Elektron Işını*

Beşinci nesil BT sistemlerinde mekanik hareket söz konusu olmadığından önceki sistemlerden farklıdır. X-ışını kaynağının fiziksel olarak hareketi yerine elektronlar manyetik olarak yönlendirilmektedir. Tarayıcı, elektronik olarak açılıp kapatılan dairesel bir X-ışını kaynağı dizisi kullanır. Kaynaklar kavisli bir floresan ekrana yansıtılır, böylece bir X-ışını kaynağı açıldığında, parçanın büyük bir hacmi aynı anda görüntülenir ve kaynaktan ayrılan bir ışın konisi için projeksiyon verisi sağlanır. Burada üç boyutlu bir nesnenin iki boyutlu izdüşümlerinin bir dizisi toplanır (Cantatore ve Müller, 2024; Sürmen, 2022).

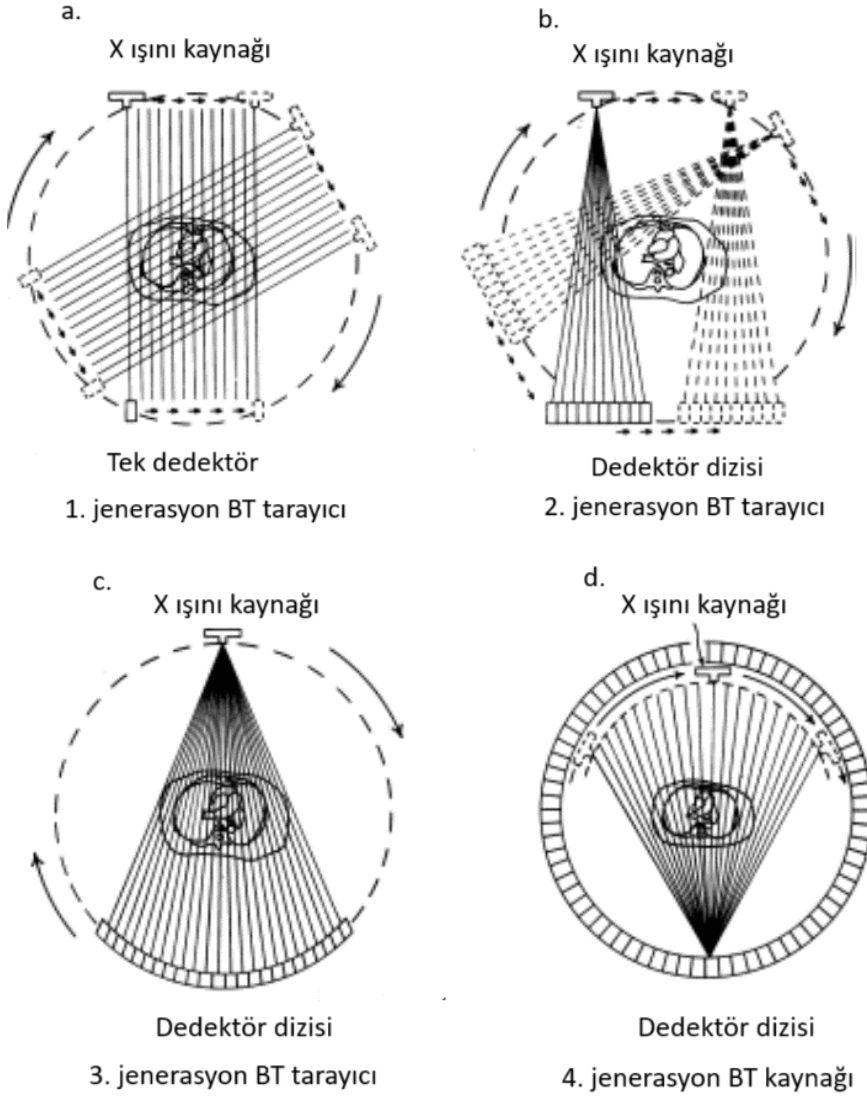
### *Spiral/Helisel Tarama*

Daha hızlı tarama sürelerine ve özellikle üç boyutlu görüntüleme için hızlı çoklu taramalara duyulan ihtiyaç, spiral (helisel) tarama sistemlerinin geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır. Hem üçüncü hem de dördüncü nesil sistemler, dönen bileşenlerle elektrik bağlantıları yapmak için kendi kendini yağlayan kayar halka teknolojisini kullanarak bunu başarmaktadır. Bu, aksi takdirde taramalar arasında yeniden sarılması gereken güç ve sinyal kablolarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır ve x-ışını fan ışınının sürekli dönen hareketine olanak tanır. Hasta, her görüntü için durmak yerine, düzgün ve sürekli bir hareketle gantry boyunca çevrilirken çoklu görüntüler elde edilir (Şekil 6) (Cunningham ve Judy; 2000).

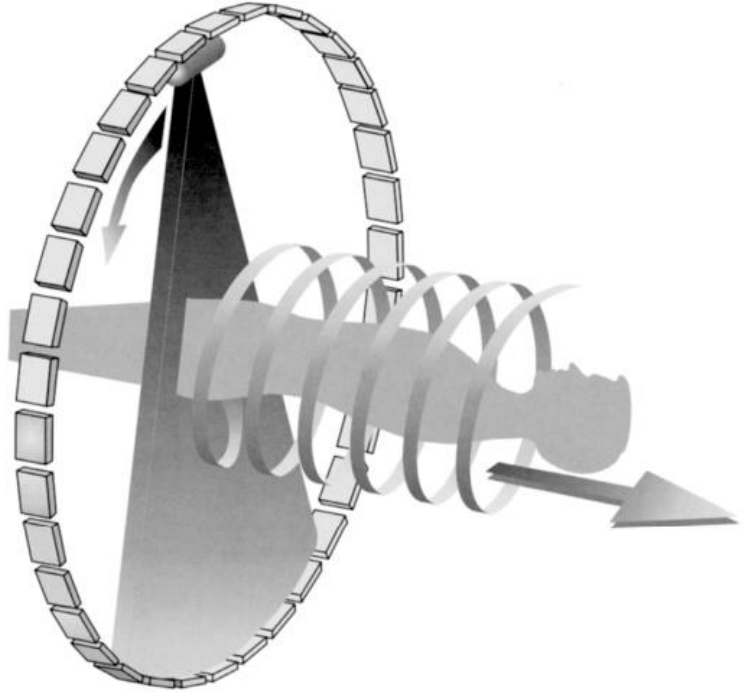
Günümüzde kullanılan yeni nesil BT tarayıcılar ile tarama öncesinde hastanın maruz kalacağı radyasyonun simüle edilmesi mümkün hale gelmiştir. Ayrıca, BT inceleme protokollerinin optimize edilmesi (hasta konumlandırma, merkezleme, gantry eğme, kV ve mAs ayarı, tarama uzunluğu dahil), tarayıcının doğal doz tasarrufu mekanizmalarının (tüp akımı modülasyonu) kullanımının en üst düzeye çıkarılması gibi ayarlamalarla da radyasyon dozunun azaltılması mümkün olmaktadır (Bos ve ark., 2023).

Geçmişten günümüze kadar BT radyasyon dozunu azaltmaya yönelik birçok teknolojik ilerleme kaydedilmiş olsa bile tüp akımı ve tüp potansiyeli gibi temel tarama parametrelerinin değiştirilmesi doz optimizasyonunun en önemli aracı olmaya devam etmektedir. Modern Multi dedektörlü Bilgisayarlı Tomografi (MDBT) cihazlarında yinelemeli yeniden yapılandırma teknolojileri kullanılmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde gelişmiş görüntü kontrastı değişmeden daha düşük tüp potansiyeli kullanılabilir.





Şekil 5. Belirli nesil BT sistemlerinin gösterimi (Třebuňová ve ark., 2017).



Şekil 6. Spiral tarama (Cunningham ve Judy; 2000).

### **Tüp Potansiyeli ve Bilgisayarlı Tomografi Radyasyon Dozu**

Tüp potansiyeli, X-ışını tütünün anot ve katodu arasındaki voltaj farkıdır. Çoğu üretici tüp potansiyelini doz sayfasında listeler. Genellikle kilovolt için kV veya kilovolt tepe noktası için kVp olarak kısaltılır (Lira ve ark., 2015). Radyasyon dozunun azaltılmasına odaklanan birden fazla tıbbi organizasyonun bir araya gelmesiyle oluşan Image Gently, pediatrik BT için azaltılmış tüp akımı ve pik kilovoltajı önermektedir (Reid ve ark., 2010).

Tüp potansiyelinin radyasyon dozuyla polinomsal bir ilişkisi vardır ve tanısal enerji aralığında radyasyon maruziyeti tüp potansiyel değerinin karesiyle yaklaşık olarak orantılıdır. Bu durum, tüp voltajındaki küçük bir azalmanın tüp akımıyla karşılaştırıldığında önemli bir doz azalmasına yol açtığı anlamına gelir ((Negayama ve ark., 2018). 70 ila 100 kVp'de BT görüntüleme, özellikle BT anjiyografik çalışmalarda ve pediatrik hastalar gibi küçük vücut yapısına sahip bireylerde, standart 120 kVp inceleme protokollerine kıyasla hasta radyasyon dozunda önemli bir azalma ve görüntü kontrastında önemli bir artış sağlar (Papadakis ve Damilakis, 2019). Örneğin, diğer tüm parametreler değişmeden kaldığında tüp voltajının 120 kVp'den 100 kVp'ye düşürülmesi, radyasyon dozunda %33 doz azalma veya 120 kVp'den 80 kVp'ye düşürülmesi ise

radasyon dozunda %65 azalma sağlar. Azalmış foton akısını telafi etmek için tp akımı ve pozlama süresi artırılrsa bile, düşük tp voltajı taramaları, tanısal görüntü kalitesini korurken çoğu pediatrik BT muayenesi için radasyon dozunu azaltır (Negayama ve ark., 2018).

Tp potansiyelinin seçimi genellikle hastanın boyutuna ve gerçekleştirilen çalışma türüne dayanır. Bazı üreticiler, belirli bir boyuttaki bir hasta için belirli bir tanı görevi için gereken görüntü kalitesini sağlayacak ve potansiyel olarak radasyon dozunu azaltacak en doz açısından verimli tp potansiyelini belirleyen otomatik bir voltaj seçici sunar (Zhao ve ark., 2022). Özellikle kk çocuklarda yetişkinlere kıyasla daha düşük tp potansiyelinin kullanımı daha fazla avantaj sağlamaktadır. Çünkü kk çocukların x-ışını foton enerjisi gereksinimleri daha dşktir. Bu nedenle, tp potansiyeli azaltımı, tanı bilgilerini etkilemeden kk çocuklarda radasyon dozunu azaltmanın belki de en etkili yoludur.

Tekrarlı rekonstrüksiyonun kullanımıyla, daha düşük tp potansiyelinin kullanımına ilişkin sınırlar artık göğüs veya karın BT'si çekilen daha büyük yetişkin hastalara kadar genişletilmiştir. Vücut ağırlığına ve daha kk hastalar için daha düşük tp potansiyeline dayanan pediatrik göğüs ve karın BT protokolleri, tanısal görüntü kalitesini etkilemeden önemli miktarda doz azaltımıyla sonuçlanmıştır (Lira ve ark., 2015).

## KAYNAKLAR

- Anonim, First Computerized Axial Tomography Scanner, The CAT Scan Conceived By Sir Godfrey Newbold Hounsfield1960's. Erişim Tarihi: 20.10.2024. Available from: <https://scintacor.com/first-computerized-axial-tomography-scanner-the-cat-scan-conceived-by-sir-godfrey-newbold-hounsfield1960s/>.
- Bos D, Guberina N, Zensen S, Opitz M, Forsting M, Wetter A. Radiation Exposure in Computed Tomography. Dtsch Arztebl Int. 2023; 13;120(9):135-141.
- Cantatore A, Müller P. Introduction to computed tomography. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Available from: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/51297792/Introduction\\_to\\_CT.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/51297792/Introduction_to_CT.pdf)
- Cunningham IA, Judy PF. Computed Tomography. The biomedical engineering handbook, 2000; 62-61.
- Erdem H, Küçük İ, Dadak A (2022). Brakiterapi Uygulamalarında Güncel Gelişmeler. Sağlık Bilimlerinde Uluslararası Araştırmalar-I, Serüven Yayınevi, Editör: ŞAHNA E, AKGÜL Ha, SELAMOĞLU Z, 1. Basım, Sayfa sayısı:367, ISBN:978-605-72852-8-7; 71-84.
- Erdem, H., Göde, A., Dadak, A. (2024a) Sağlık Eğitimi Alan Ön Lisans Öğrencilerinin Radyasyondan Korunma Bilgisinin İncelenmesi. Journal of Selcuk Health, 5(2):1-15.
- Erdem, H., Dadak A., Göde, A. (2024b). Tıbbi Görüntüleme Öğrencilerinin Radyasyondan Korunma Bilgisi ile Radyasyon Tutumu Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. Journal of Academic Value Studies, 10 (3), 154-162.
- Huda W, Ravenel JG, Scalzetti EM. How do radiographic techniques affect image quality and patient doses in CT? Seminars in Ultrasound, CT and MRI. 23(5), 2002, 411-422.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). <https://www.iaea.org/Publications/Factsheets/English/radlife#types>. Erişim tarihi: 20.10.2024
- Institute of Medicine. Committee to Study the Feasibility of, and Need for, Epidemiologic Studies of Adverse Reproductive Outcomes in the Families of Atomic Veterans. Adverse Reproductive Outcomes in Families of Atomic Veterans: The Feasibility of Epidemiologic Studies. Washington (DC): National Academies Press (US); 1995. 4, Basic Principles of Radiation Biology. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK232435/>

- Kaya T, Adapınar B, Özkan R (Editör: Tamer Kaya). Temel Radyoloji Tekniği, Güneş & Nobel Tıp Kitapevleri, Bursa, 1997.
- Küçük N, Dadak A, Erdem H, Küçük İ. (2022). Malign Hipertermi. Gece Kitaplığı, Editör: Evereklioğlu Cem, Erten Mehmet, SAĞLIK BİLİMLERİNDE GÜNCEL ARAŞTIRMALAR 1. Basım, ISBN:978-625-430-048-6, 305-314.
- Lira D, Padole A, Kalra MK, Singh S. Tube Potential and CT Radiation Dose Optimization. *AJR*, 2015; 204.
- McCullough CH. The AAPM/RSNA physics tutorial for residents. X-ray production. *Radiographics*. 1997; 17(4):967-84.
- MOE (Ministry of the Environment Government). BOOKLET to Provide Basic Information Regarding Health Effects of Radiation. 4th edition, Chapter 1: Basic Knowledge on Radiation. Available from: <https://www.env.go.jp/en/chemi/rhm/basic-info/1st/index.html>, Erişim tarihi: 23.10.2024.
- Nagayama Y, Oda S, Nakaura T, Tsuji A, Urata J, Furusawa M, Utsunomiya D, Funama Y, Kidoh M, Yamashita Y. Radiation Dose Reduction at Pediatric CT: Use of Low Tube Voltage and Iterative Reconstruction. *RadioGraphics* 2018 38:5, 1421-1440.
- Papadakis AE, Damilakis J. Automatic Tube Current Modulation and Tube Voltage Selection in Pediatric Computed Tomography: A Phantom Study on Radiation Dose and Image Quality. *Invest Radiol*. 2019; 54(5):265-272.
- Patel PR, De Jesus O. CT Scan. [Updated 2023 Jan 2]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK567796/>
- Reid J, Gamberoni J, Dong F, Davros W. Optimization of kVp and mAs for Pediatric Low-Dose Simulated Abdominal CT: Is It Best to Base Parameter Selection on Object Circumference? 2010; 194(4).
- Ron E. Ionizing radiation and cancer risk: evidence from epidemiology. *Radiat Res*. 1998;150(5 Suppl):30-41.
- Schulz RA, Stein JA, Pelc NJ. How CT happened: the early development of medical computed tomography. *J Med Imaging (Bellingham)*. 2021; 8(5):052110.
- Seibert JA. X-Ray Imaging Physics for Nuclear Medicine Technologists. Part 1: Basic Principles of X-Ray Production. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, 2004; 32(3):139-147.
- Sürmen HK. Bilgisayarlı Tomografi ile Üç Boyutlu (3b) Tarama. *UMÜFED Uluslararası Batı UMUFED Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2022; 4(2): 1-21.

- Tafti D, Maani CV. X-ray Production. In: StatPearls. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL); 2023. PMID: 30725731.
- Trebuňová M, Laputková G, Živčák J. COMPUTED TOMOGRAPHY – ITS DEVELOPMENT AND PRINCIPLE. International Scientific Journal about Simulation. 2017; 3(3), 11-15.
- Zhao A, Fopma S, Agrawal R. Demystifying the CT Radiation Dose Sheet. RadioGraphics. 2022; 42(4):1239-1250
- Zink FE. X-ray tubes. RadioGraphics, 1997; 17(5).
- Küçük N, Dadak A, Erdem H, Küçük İ. (2022). Malign Hipertermi. Gece Kitaplığı, Editör: Evereklioğlu Cem, Erten Mehmet, SAĞLIK BİLİMLERİNDE GÜNCEL ARAŞTIRMALAR 1. Basım, ISBN:978-625-430-048-6, 305-314.

## **Bölüm 9**

### **Farklı Tür Yağlayıcıların Tribolojik Özelliklerinin Nanopartikül Katkılarıyla İyileştirilmesi**

**M. Salih GÜL<sup>1</sup>**  
**M. Tayyip ÖZDEMİR<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye,  
[msalihgul@karabuk.edu.tr](mailto:msalihgul@karabuk.edu.tr)

<sup>2</sup> Arş. Gör. Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye,  
[tayyipozdemir@karabuk.edu.tr](mailto:tayyipozdemir@karabuk.edu.tr)

## GİRİŞ

Triboloji, endüstriyel sistemlerde enerji tüketimi, malzeme kaybı ile yakından ilişkili olan temas arayüzlerindeki sürtünme, aşınma, yağlama ve bunların birbirleriyle olan ilişkilerini araştıran bir bilim dalıdır (Kuang, Miao, Ding, & Li, 2022). İstatistiksel olarak incelendiğinde, tribolojik temasların neden olduğu enerji tüketiminin %20'si sürtünmeyi aşmak için kullanılırken, %3'ü ise aşınmış parçaların yeniden imalatında kullanılmaktadır (Holmberg & Erdemir, 2017). Son yıllarda sürtünmenin verimlilik, dayanıklılık ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle hareketli mekanik sistemlerdeki arızaları azaltmak yüksek oranda ilgi görmektedir.

Günümüzde sürtünme ve aşınmanın neden olduğu enerji kaybı ve malzeme tüketimi esas olarak yüzey mühendisliği, yağlama, aşınmaya dayanıklı malzemeler ve tribolojik tasarım yollarıyla azaltılmaktadır (Q. Huang, Shi, Xue, Zhang, & Wu, 2023). Bunlar arasında bulunan tribolojide yağlama konusu, mekanik sistemlerin aşınma performanslarını iyileştirmek için ana yöntemlerdendir. Yağlama, sıvı yağlama ve katı yağlama dahil olmak üzere temas yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmak için yağlayıcılar kullanan bir teknolojidir (Street, Miyoshi, & Vander Wal, 2007). Son yıllarda, sürtünmenin verimlilik, dayanıklılık ve çevre uyumluluğu üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle hareketli mekanik sistemlerdeki sürtünmeyi ve aşınmayla ilgili mekanik arızaları azaltmak daha fazla ilgi görmüştür. Bu nedenle, yağlayıcılarda mikro/nano malzemelerin, sert/yumuşak kaplamaların ve yüzey dokularının harmanlanması gibi etkili yağlama yöntemlerini kullanarak tribo-dinamik davranışları iyileştirmeye ihtiyaç vardır (A. A. S. W. Singh & Waydande, 2017). Yağlayıcılara eklenen nanopartiküller enerji kaybını azaltmakta, makine elemanlarının ömrünü uzatmakta ayrıca sürtünmeyi ve aşınmayı minimuma indirerek çevrenin korunmasına yardımcı olmaktadır. Araştırmalar, mekanik sistemlerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için düşük oranda eklenen nanopartikül konsantrasyonunun bile yeterli olabileceğini kanıtlamıştır. Nano akışkanlar, içinde nano boyutlu parçacıkların (1–100 nm) katkı olarak eklendiği temel bir akışkandan oluşan nispeten yeni akışkan sınıfıdır. Nano akışkanlarda genellikle nanopartiküller olarak metaller, oksitler, karbürler veya karbon nanotüpler kullanılmaktadır (A. Singh, Chauhan, & Mamatha, 2019). Nanopartiküller, eklendikleri yağlayıcılarla birlikte, sürtünmeyi azaltmakta, yakıt tasarrufunu sağlamakta, çalışma sıcaklıklarında azalma, yağlayıcı ömrünü uzatma, oksidasyonu düşürme, korozyon önleme gibi yüksek oranda fayda sağlamaktadır. Yağlayıcılara katkı olarak eklenen nanopartiküller, otomobil ve ağır hizmet tipi motor yağı, şanzıman sıvıları ve otomatik dişli yağları, lokomotif ve deniz dizel motor yağları ve büyük dizel motor yağı dahil olmak üzere çeşitli



uygulamalarda kullanılmaktadır. Nanopartikül eklenmiş yağlayıcılar ile katı metal yüzeyler arasında bir yağlayıcı film bariyeri oluşturarak veya birkaç katman nanomalzeme katkısı oluşturarak metal yüzeylerdeki oksidatif bozulmalar önlemiştir (Rashmi, Khalid, Lim, Gupta, & Arwin, 2017). Aynı zamanda yük taşıma kapasitesini güçlü bir şekilde artıran mükemmel sonuçlar elde edilmiştir (Krämer, Kim, Kim, & Bennewitz, 2019).

Bu çalışmada mineral, bitkisel ve sentetik yağlayıcılara katkı olarak eklenen nanopartiküllerin tribolojik özellikleri ele alınmış, literatür taramasıyla desteklenerek özetlenmiştir.

### **Nanopartiküllerin Mineral Yağlara Katkı Olarak Eklenmesi**

Mineral yağlara nanopartiküller katkı olarak eklendiği zaman gelişmiş tribolojik özellikler gözlenmiştir. Bakır nanopartiküllerinin SAE30 motor yağına katkı olarak eklenmesi, bakırın kimyasal birikimi yoluyla yüzey topolojisini değiştirmiş ve baz yağın yağlama özelliklerini bozmamıştır (Tarasov, Kolubaev, Belyaev, Lerner, & Tepper, 2002). Rapoport ve diğerleri, parafin yağına inorganik fulleren benzeri nanopartikülleri katkı olarak eklemiştir. Bunun sonucunda sürtünme esnasında temas oranını azaltarak tribolojik özelliklerin iyileştiğini vurgulamışlardır (Rapoport et al., 2003). Huang ve diğerleri, grafit nanopartiküllerin parafin yağına katkı olarak eklenmesiyle oluşan yağlayıcının tribolojik özelliklerini incelemiştir. Gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda parafin yağının aşınma direncinde ve yük taşıma kapasitesinde iyileşme gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısının düştüğünü bunun da temas yüzeylerinde nanopartiküllerin film tabakası oluşturması sebebiyle olduğunu belirtmişlerdir (H. D. Huang, Tu, Gan, & Li, 2006). Kang ve diğerleri, oleik asitle modifikasyonu yapılmış bakır sülfür (CuS) nanopartiküllerinin mükemmel sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Parafin yağına katkı olarak eklenen bu nanopartikül, aşınma oranında %50'ye yakın iyileştirmeye sebep olmuştur (Kang, Wang, Zhu, & Zhu, 2008). Yu ve diğerleri, yüzey kaplamalı serpantin ultra ince tozu 50cc sınıfı dizel yağında süspansiyon edildiğinde sürtünme ve aşınmada bir azalma gözlemlenmiştir (Yu et al., 2010). Ağırılıkça %0,5 konsantrasyon oranında modifiye edilmiş  $Al_2O_3 / SiO_2$  kompozit nanopartiküller, mineral yağ katkı maddesi olarak eklenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda sürtünme katsayısındaki azalma yüzdesi sırasıyla %50, %22 ve %25 olarak belirtilmiştir. Mineral yağa ağırılıkça %0,5 konsantrasyon oranında modifiye  $Al_2O_3 / SiO_2$  kompozit nanopartiküllerinin eklenmesi aşınma izi çapını %22,16 oranında azaltmıştır (Jiao, Zheng, Wang, Guan, & Cao, 2011). Xiang ve diğerleri, baz yağa demir oksit ( $Fe_3O_4$ ) nanopartiküllerinin eklenmesinin sürtünme önleme performansını artıracığını

belirtmiştir. Ağırlıkça %1,5 konsantrasyon oranında Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanopartikül katkısı içeren SAE 40 baz yağının ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma izi çapı, herhangi bir katkı maddesi içermeyen saf SAE 40 baz yağına kıyasla sırasıyla %18,06 ve %11,2 oranında azalmıştır (Xiang, Gao, Wang, Pan, & Hu, 2014). Luo ve diğerleri, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartiküllerinin yağlayıcılara katkı maddesi olarak eklenmesinin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Yüzeyi modifiye edilmiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülleri iyi dispersiyon kararlılığı göstermiştir ve dört bilyalı test cihazından elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma izi çapı sırasıyla %17,16 ve %41,75'lik bir azalma göstermiştir (Luo, Wei, Huang, Huang, & Yang, 2014).

### **Nanopartiküllerin Bitkisel Yağlara Katkı Olarak Eklenmesi**

Bitkisel yağlar çeşitli tarım ham maddelerinden üretilmektedir. Mükemmel yağlayıcı özellikleri nedeniyle mineral yağ bazlı yağlayıcılar için potansiyel bir ikame olarak kabul edilirler. Bitkisel yağlar biyolojik olarak parçalanabilir, toksik değildir ve kolayca atılabilir. Thottackkad ve diğerleri, hindistan cevizi yağına CuO nanopartiküllerini katkı olarak eklemiştir. Sonuçlar en düşük sürtünme katsayısının ve aşınma oranının %0,34 ağırlıktaki optimum CuO nanopartikül konsantrasyonu için elde edildiğini göstermiştir. Nano katkı maddesi eklendikten sonra viskozite ve yanma noktası artmış, buna karşın yüzey pürüzlülüğünün ise azaldığı belirtilmiştir (Thottackkad, Perikinalil, & Kumarapillai, 2012). Gulzar ve diğerleri, kimyasal olarak modifiye edilmiş palmye yağının aşınma ve aşırı basınç özelliklerini iyileştirmede CuO ve MoS<sub>2</sub> nanopartiküllerinin etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, bu nanopartiküllerin değerlendirilen özellikleri 1,5 kat artırdığını göstermiştir. MoS<sub>2</sub> nanopartikülleri CuO'dan daha iyi özellikler ve dispersiyon kararlılığı gösterdiği belirtilmiştir (Gulzar et al., 2015). Suthar ve diğerleri, jojoba yağı için katkı maddesi olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülleri kullanmışlardır. Minimum sürtünme ve aşınma ağırlıkça %0,1 konsantrasyon oranında elde edilmiştir (Suthar, Singh, Surana, Rajubhai, & Sharma, 2020). Cortes ve diğerleri, yağlayıcı katkı maddesi olarak silikon dioksit (SiO<sub>2</sub>) ve titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) nanopartiküllerinin eklenmesinin ayçiçek yağının tribolojik ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, reolojik özelliklerin kullanılan nanopartiküllerin türüne ve konsantrasyonuna bağlı olduğunu göstermiştir. TiO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> nanopartikülleri sürtünme katsayısını ve aşınma hacim kaybını sırasıyla %93,7 ve %70,1 ve %77,7 ve %74,1 oranında azaltmıştır (Cortes, Sanchez, Gonzalez, Alcoutlabi, & Ortega, 2020).

## **Nanopartiküllerin Sentetik Yağlara Katkı Olarak Eklenmesi**

Sentetik yağlar kimyasal bileşiklerden veya petrol bileşenlerinin kimyasal modifikasyonu ile yapay olarak yapılmaktadır. Bu yağlar, sistem çok aşırı sıcaklıklarda çalıştığında kullanılmaktadır. Battez ve diğerleri, iki farklı dağıtıcı madde varlığında PAO6'ya ZnO nanopartiküllerini katkı olarak eklemişlerdir. PAO6 yağı, ağırlıkça %3 konsantrasyon oranında ZnO nanopartikül ve ağırlıkça %3 konsantrasyon oranında dağıtıcı madde (Ester-OL300) eklendiğinde, başka bir dağıtıcı madde (Ester-OL100) ile karşılaştırıldığında daha iyi tribolojik özellikler göstermiştir (Hernandez Battez et al., 2006). Kalin ve diğerleri, PAO baz yağına eklendiğinde MoS<sub>2</sub> çok duvarlı nanotüplerin sürtünme katsayısını 2 kat ve aşınma katsayısını sırasıyla 5 ila 9 kat azalttığını bulmuşlardır. Nanotüplerin katkı maddesi olarak kullanılmasının aşınmayı veya yüzey deformasyonunu tamamen ortadan kaldırdığı sonucuna varılmış ve ayrıca etkili yağlama için parçacık boyutunun mümkün olduğunca küçük olması gerektiği önerilmiştir (Kalin, Kogovšek, & Remškar, 2012). Paras ve diğerleri, CuO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülleri içeren SAE 75W- 85 yağı ve Polialfaolefin 8 (PAO8) bazlı nano-sıvıları incelemişlerdir. Sonuçlar, ağırlıkça %2 konsantrasyon oranında CuO nanopartiküllerinin eklenmesinden sonra PAO8'in sürtünme katsayısının ve aşınma izi çapının sırasıyla %18 ve %14 oranında azaldığını göstermiştir. Yük taşıma kapasitesinin de CuO nanopartiküllerinin varlığıyla arttığı belirtilmiştir (Peña-Parás et al., 2015). Cura ve diğerleri, ticari olarak temin edilebilen sentetik yağ için yağlayıcı katkı maddesi olarak grafen nano-plaklarının tribolojik performansı hakkında bir ön çalışma yürütmüşlerdir. Gerçekleştirilen çalışma sonucu grafenin yağlayıcı katkı maddesi olarak kullanılmak üzere umut vadeden bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır (Curà, Mura, & Adamo, 2018). Sivakumar ve diğerleri, atık karbon kaynaklarından çıkarılan grafen, grafen oksit ve grafit oksidin, üstün mekanik mukavemetleri ve lamelli yapıları nedeniyle yağlama endüstrilerinde çeşitli potansiyel uygulamalara sahip olduğunu belirtmişlerdir (Sivakumar, Ranjan, Ramaprabhu, & Kamaraj, 2020). Nanopartiküllerin katkı olarak farklı tip yağlayıcılarla kullanılması ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar ve kısa sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Nanopartiküllerin yağlayıcılara katkı olarak eklenmesi ve tribolojide kullanımı.

Nanopartikül+ Yağlayıcı	Konsantrasyon	Sonuç	Referans
MoS <sub>2</sub> + Endüstriyel Yağ	%0,015-0,1	~ %30 oranında sürtünme katsayısı azalmıştır.	(Kotsyubynsky et al., 2021)
SiO <sub>2</sub> + Neem Yağı	% 0,15-0,9	%0,3 SiO <sub>2</sub> içeren neem yağı minimum COF ve aşınma göstermiştir.	(Mahara & Singh, 2020)
Grafit oksit + Motor Yağı	% 0,05-0,20	Grafit oksit katkısı sürtünmeyi (%2,8-21,1 azalma), aşınmayı (%8,2-18,5 azalma) iyileştirmiştir.	(Sivakumar et al., 2020)
ZnO+Euphorbia Lathyrus Yağı	% 0,2-0,8	Yağa %0,5 oranında nano ZnO eklenmesi, COF'da yaklaşık %8,23 ve aşınmada %5,13 oranında bir azalma göstermiştir.	(Y. Singh et al., 2021)

## SONUÇ

Bu çalışmada, mineral, sentetik ve bitkisel yağlara katkı maddesi olarak eklenen nanopartiküllerin kullanımları hakkında kapsamlı bir literatür incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu inceleme sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. Nanopartiküllerin kullanımının yağlayıcıların tribolojik özelliklerini iyileştirmek için etkili bir çözüm olduğu gözlenmiştir.
2. Yağlayıcılara katkı olarak eklenen ağırlıkça çok düşük oranda nanopartiküllerin malzemelerin tribolojik özelliklerine olumlu anlamda etkilerinin olduğu tespit edilmiştir.
3. Nanopartiküllerin aşınma ortamlarında gösterdiği, yuvarlanma etkisi ve tribo-film oluşturma yetenekleri sayesinde sürtünmeye maruz kalan yüzeylerdeki aşınma oranlarının düştüğü belirtilmiştir.
4. Ancak nanopartikül katkılı yağlayıcıların ticarileşmesinde önemli rol oynayan dispersiyon kararlılığı, sentezi ve ekonomik uygulanabilirliği gibi konularda daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Cortes, V., Sanchez, K., Gonzalez, R., Alcoutlabi, M., & Ortega, J. A. (2020). The Performance of SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> Nanoparticles as Lubricant Additives in Sunflower Oil. *Lubricants* 2020, Vol. 8, Page 10, 8(1), 10. doi:10.3390/LUBRICANTS8010010
- Curà, F., Mura, A., & Adamo, F. (2018). Experimental investigation about tribological performance of grapheme-nanoplatelets as additive for lubricants. *Procedia Structural Integrity*, 12, 44–51. doi:10.1016/J.PROSTR.2018.11.107
- Gulzar, M., Masjuki, H., Varman, M., Kalam, M., Mufti, R. A., Zulkifli, N., ... Zahid, R. (2015). Improving the AW/EP ability of chemically modified palm oil by adding CuO and MoS<sub>2</sub> nanoparticles. *Tribology International*, 88, 271–279. doi:10.1016/J.TRIBOINT.2015.03.035
- Hernandez Battez, A., Fernandez Rico, J. E., Navas Arias, A., Viesca Rodriguez, J. L., Chou Rodriguez, R., & Diaz Fernandez, J. M. (2006). The tribological behaviour of ZnO nanoparticles as an additive to PAO6. *Wear*, 261(3–4), 256–263. doi:10.1016/J.WEAR.2005.10.001
- Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5(3), 263–284. doi:10.1007/S40544-017-0183-5/METRICS
- Huang, H. D., Tu, J. P., Gan, L. P., & Li, C. Z. (2006). An investigation on tribological properties of graphite nanosheets as oil additive. *Wear*, 261(2), 140–144. doi:10.1016/J.WEAR.2005.09.010
- Huang, Q., Shi, X., Xue, Y., Zhang, K., & Wu, C. (2023). Recent progress on surface texturing and solid lubricants in tribology: Designs, properties, and mechanisms. *Materials Today Communications*, 35, 105854. doi:10.1016/J.MTCOMM.2023.105854
- Jiao, D., Zheng, S., Wang, Y., Guan, R., & Cao, B. (2011). The tribology properties of alumina/silica composite nanoparticles as lubricant additives. *Applied Surface Science*, 257(13), 5720–5725. doi:10.1016/J.APSUSC.2011.01.084
- Kalin, M., Kogovšek, J., & Remškar, M. (2012). Mechanisms and improvements in the friction and wear behavior using MoS<sub>2</sub> nanotubes as potential oil additives. *Wear*, 280–281, 36–45. doi:10.1016/J.WEAR.2012.01.011
- Kang, X., Wang, B., Zhu, L., & Zhu, H. (2008). Synthesis and tribological property study of oleic acid-modified copper sulfide nanoparticles. *Wear*, 265(1–2), 150–154. doi:10.1016/J.WEAR.2007.09.009
- Kotsyubynsky, V., Shyyko, L., Shihab, T., Prysyzhnyuk, P., Aulin, V., & Boichuk, V. (2021). Multilayered MoS<sub>2</sub>/C nanospheres as high

- performance additives to lubricating oils. *Materials Today: Proceedings*, 35, 538–541. doi:10.1016/j.matpr.2019.10.021
- Krämer, G., Kim, C., Kim, K. S., & Bennewitz, R. (2019). Single layer graphene induces load-bearing molecular layering at the hexadecane-steel interface. *Nanotechnology*, 30(46), 46LT01. doi:10.1088/1361-6528/AB3CAB
- Kuang, W., Miao, Q., Ding, W., & Li, H. (2022). A short review on the influence of mechanical machining on tribological and wear behavior of components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3–4), 1401–1413. doi:10.1007/S00170-022-08895-W/FIGURES/9
- Luo, T., Wei, X., Huang, X., Huang, L., & Yang, F. (2014). Tribological properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles as lubricating oil additives. *Ceramics International*, 40(5), 7143–7149. doi:10.1016/J.CERAMINT.2013.12.050
- Mahara, M., & Singh, Y. (2020). Tribological analysis of the neem oil during the addition of SiO<sub>2</sub> nanoparticles at different loads. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1412–1415. doi:10.1016/J.MATPR.2020.04.813
- Peña-Parás, L., Taha-Tijerina, J., Garza, L., Maldonado-Cortés, D., Michalczewski, R., & Lapray, C. (2015). Effect of CuO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives on the tribological behavior of fully formulated oils. *Wear*, 332–333, 1256–1261. doi:10.1016/J.WEAR.2015.02.038
- Rapoport, L., Leshchinsky, V., Lapsker, I., Volovik, Y., Nepomnyashchy, O., Lvovsky, M., ... Tenne, R. (2003). Tribological properties of WS<sub>2</sub> nanoparticles under mixed lubrication. *Wear*, 255(7–12), 785–793. doi:10.1016/S0043-1648(03)00044-9
- Rashmi, W., Khalid, M., Lim, X. Y., Gupta, T. C. S. M., & Arwin, G. Z. (2017). Tribological studies on graphene/TMP based nanolubricant. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(2), 365–373. Retrieved from <https://researchportal.hw.ac.uk/en/publications/tribological-studies-on-graphenetmp-based-nanolubricant>
- Singh, A. A. S. W., & Waydande, S. S. (2017). A review paper on performance analysis of hydrodynamic journal bearing with various types of lubricant for pressure distribution and cavitation. *Int J Adv Eng Res Dev*, 4, 347–354. Retrieved from [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=A review paper on performance analysis of hydrodynamic journal bearing with various types of lubricant for pressure distribution and cavitation&publication\\_year=2017&author=Arti Singh&author=S.S. Waydande](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=A+review+paper+on+performance+analysis+of+hydrodynamic+journal+bearing+with+various+types+of+lubricant+for+pressure+distribution+and+cavitation&publication_year=2017&author=Arti+Singh&author=S.S.+Waydande)

- Singh, A., Chauhan, P., & Mamatha, T. G. (2019). A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Materials Today: Proceedings*, 25, 586–591. doi:10.1016/j.matpr.2019.07.245
- Singh, Y., Kumar Singh, N., Sharma, A., Singla, A., Singh, D., & Abd Rahim, E. (2021). Effect of ZnO nanoparticles concentration as additives to the epoxidized Euphorbia Lathyris oil and their tribological characterization. *Fuel*, 285, 119148. doi:10.1016/J.FUEL.2020.119148
- Sivakumar, B., Ranjan, N., Ramaprabhu, S., & Kamaraj, M. (2020). Tribological properties of graphite oxide derivative as nano-additive: Synthesized from the waster carbon source. *Tribology International*, 142, 105990. doi:10.1016/J.TRIBOINT.2019.105990
- Street, K. W., Miyoshi, K., & Vander Wal, R. L. (2007). Application of Carbon Based Nano-Materials to Aeronautics and Space Lubrication. *Superlubricity*, 311–340. doi:10.1016/B978-044452772-1/50050-0
- Suthar, K., Singh, Y., Surana, A. R., Rajubhai, V. H., & Sharma, A. (2020). Experimental evaluation of the friction and wear of jojoba oil with aluminium oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles as an additive. *Materials Today: Proceedings*, 25, 699–703. doi:10.1016/J.MATPR.2019.08.150
- Tarasov, S., Kolubaev, A., Belyaev, S., Lerner, M., & Tepper, F. (2002). Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil. *Wear*, 252(1–2), 63–69. doi:10.1016/S0043-1648(01)00860-2
- Thottackkad, M. V., Perikinalil, R. K., & Kumarapillai, P. N. (2012). Experimental evaluation on the tribological properties of coconut oil by the addition of CuO nanoparticles. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(1), 111–116. doi:10.1007/S12541-012-0015-5/METRICALS
- Xiang, L., Gao, C., Wang, Y., Pan, Z., & Hu, D. (2014). Tribological and tribochemical properties of magnetite nanoflakes as additives in oil lubricants. *Particuology*, 17, 136–144. doi:10.1016/j.partic.2013.09.004
- Yu, H. L., Xu, Y., Shi, P. J., Wang, H. M., Zhao, Y., Xu, B. S., & Bai, Z. M. (2010). Tribological behaviors of surface-coated serpentine ultrafine powders as lubricant additive. *Tribology International*, 43(3), 667–675. doi:10.1016/J.TRIBOINT.2009.10.006

## 10. Bölüm

### Bulanık Kümeleme ve Destek Vektörleri ile Sinir Ağı Güçlendirme Uygulamaları

Nisa SARI<sup>1</sup>  
Mehmet ACI<sup>2</sup>  
Gizen MUTLU<sup>3</sup>  
Çiğdem ACI<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> Arş.Gör.; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.; nvuran@mersin.edu.tr ORCID: 0000-0001-7042-3031

<sup>2</sup> Dr.Öğr. Üyesi; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü; maci@mersin.edu.tr ORCID: 0000-0002-7245-8673

<sup>3</sup> Arş.Gör.; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.; gmutlu@mersin.edu.tr ORCID: 0000-0001-7553-2077

<sup>4</sup> Doç.Dr.; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü; caci@mersin.edu.tr ORCID: 0000-0002-0028-9890



## ÖZET

Bu çalışmada, sinir ağlarının kullanımında Regülerize Edilmiş Bulanık Kümeleme Sinir Ağı'nın (RFCNN) gürültülü ve uyumsuz veriler karşısında dayanıklılığının artırılması amaçlanmıştır. Geleneksel sinir ağları, gürültülü verilerle çalışırken performans düşüşleri yaşamaktadır. Bu sorunu ele almak için, destek vektör tabanlı (Support Vector, SV) tabanlı Hiyerarşik Bulanık C-Ortalamalar (Hierarchical Fuzzy C-Means, HFCM) ve Bulanık C-Ortalamalar (Fuzzy C-Means, FCM) kümeleme tekniklerini L2-norm düzenleme ile birleştirerek daha dayanıklı bir model geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Çalışmada, SV tabanlı kümeleme tekniklerinin aykırı değerlerin etkilerini azaltarak modelin performansını iyileştirdiği gösterilmiştir. L2-norm düzenlemesi, modelin aşırı uyumunu önlemek ve varyans-önyargı dengesini sağlamak için kullanılmıştır. RFCNN modelinin performansı, Wine ve Breast Cancer Wisconsin veri kümeleri üzerinde Destek Vektör Regresyonu (Support Vector Regression, SVR), Rastgele Orman (Random Forest, RF), Lineer Regresyon (Linear Regression, LR) ve Karar Ağaçları (Decision Tree, DT) gibi diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, RFCNN modelinin gürültülü veri kümelelerinde daha dayanıklı olduğunu ve geniş bir veri yelpazesinde etkili bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bulanık Kümeleme, Destek Vektörleri, Sinir Ağı

## 1. Giriş

Yapay zekâ (YZ), son yıllarda giderek artan bir popülerlik kazanmış ve hemen hemen her sektörde önemli bir rol oynamaya başlayan bir alan haline gelmiştir. Bu popülerliğin arkasında, YZ'nin sağladığı çeşitli faydalar ve işlevler bulunmaktadır, bunlar arasında otomasyon, veri analizi, tahminleme ve karar destek sistemleri gibi alanlar yer almaktadır. YZ'nin temel taşlarından biri olan sinir ağları, bu teknolojinin merkezinde yer alan bir alt alandır. Sinir ağları, insan beyninin çalışma biçimini taklit eden bir YZ modelidir ve karmaşık veri kümelerini analiz etmek, desenleri tanımak ve öğrenmek için kullanılmaktadır. İnsan öğrenme sürecini taklit ederek, sinir ağları veriler arasındaki ilişkileri keşfetmekte ve gelecekteki tahminlerde bulunmaya hizmet etmektedir (Ahmed vd., 2022).

Sinir ağlarının önemi son yıllardaki YZ algoritmalarının hızla gelişmesiyle birlikte giderek artmakta ve sürekli olarak gelişmektedir. Başlangıçta daha basit yapılarda kullanılan sinir ağları, günümüzde Derin Öğrenme (DÖ) ve karmaşık yapay sinir ağları modelleri gibi daha gelişmiş formlara evrilmiştir. Bu gelişmeler, YZ uygulamalarının daha doğru sonuçlar elde etme yeteneğini artırmış ve tüm dünyada yaygınlaşmasına katkıda bulunmuştur (Chicco vd., 2021).

Bulanık mantık ve sinir ağlarının alanı içinde, bulanık sinir ağları (Fuzzy Neural Network, FNN), son derece etkileyici bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu alanın başlıca odak noktası, bulanık mantık çıkarımını gerçekleştirmek için sinir ağı yapısının kullanılmasıdır. Dolayısıyla, geleneksel sinir ağlarında, bulanık mantıkta çıkarım parametrelerinin yorumlanmasına katkı sağlayabilecek net bir fiziksel anlamı olmamaktadır. FNN'ler son zamanlarda regresyon, sınıflandırma veya kontrol gibi çeşitli alanlarda, temel teknolojilerden biri olarak uygulanmıştır (Pratama vd., 2017). FNN'lerin belirli avantajları olmasına rağmen, bu ağlar bazı kısıtlamalar sergilemektedir. Özellikle, bulanık küme sayısı ve veri boyutu, FNN'lerin hesaplama karmaşıklığını ciddi şekilde etkileyebilir; çünkü artan bulanık ilişki sayısı hesaplamaları çok zor hale getirebilmektedir. Bu sorunu çözmek için, Tam Bağlantılı Sinir Ağı (Fully-Connected Neural Network, FNN) çeşitli yapıları içermektedir, örneğin, kümeleme teknikleri tabanlı model ve bulanık çıkarım sistemleri bunlardan bazılarıdır. Bu ağ türü, bir katmandaki her bir nöronun bir sonraki katmandaki her nörona bağlı olduğu bir yapıya sahiptir. Bu, her nöronun önceki ve sonraki katmanlar arasındaki tüm ilişkilere katıldığı anlamına gelmektedir (Sahu vd., 2022).

Geleneksel Bulanık Kümeleme Tabanlı Sinir Ağlarında (Fuzzy Clustering Based Neural Network, FCNN), gizli katmanda bulunan üyelik fonksiyonlarının parametreleri Tereddütlü Bulanık Bilişsel Haritalar (Hesitant Fuzzy Cognitive Maps, HFCM) veya Bulanık C-Means (Fuzzy C-Means, FCM) tarafından belir-

lenmektedir. Bulanık ilişkiler, bulanık kümelerin sayısı ve veri boyutundan etkilenmeyen üyelik derecesi ile doğrudan değiştirilebilir, böylece FNN'lerin hesaplama karmaşıklığı basitleştirilebilir. Ancak, HFCM veya FCM kümeleme teknikleri, her ikisi de gürültüye ve aykırı değerlere duyarlılık nedeniyle FCNN'lerin performansının kötüleşmesine yol açmaktadır (Nápoles vd., 2024). Destek Vektörleri (Support Vector, SV) tabanlı kümeleme, yalnızca veri kümesinden (SV'ler tabanlı) seçilen veri ile yeni belirlenen kümeler elde etmek için bu tarz sorunlara etkili bir çözüm sunmaktadır. Tercih edilen model, 'e' hata tolerans parametresinin optimal seçimi ve buna bağlı SV'lerin seçimi ile gerçekleştirilmiş ve etkili ön işleme için SV'lerin kullanımı ile oluşturulmuştur. Öğrenme yöntemi olarak, polinom katsayılarının bağlantı ağı ağırlıkları En Küçük Kareler Hata (Least Squared Error, LSE) tahmini kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak, model eğitimi sırasında varyans ve önyargı arasında sağlıklı bir denge olmadığı için, model çıktısı ile hedef çıktı arasındaki kare hataların toplamını en aza indiren kayıp hata (örneğin, LSE) tahmininin her zaman tahmin görevlerinde etkili olmadığı görülmektedir. Bu sorunları çözmek ve geleneksel modelin performansını ve dayanıklılığını daha da artırmak için geliştirilmiş bir Dayanıklı Bulanık Kümeleme Tabanlı Sinir Ağları (Robust Fuzzy Clustering-Based Neural Networks, RFCNN) önerilmiştir.

Bu çalışmada, RFCNN modellemesi hem SV tabanlı kümeleme tekniklerini hem de L2-norm düzenlemeyi birleştirerek sunulmuştur. SV tabanlı kümeleme teknikleri, SV tabanlı HFCM ve SV tabanlı FCM gibi, gürültülü ve aykırı değerler de dahil olmak üzere uyumsuz verilerin neden olduğu FCNN'lerin performansının bozulmasıyla başa çıkmak için tasarlanmıştır. FCNN'lerin zayıf dayanıklılığı için, L2-norm düzenleme, model eğitimi sırasında uygun bir ceza parametresi seçilerek varyans ve önyargı arasında bir denge oluşturabilmekte ve modelin dayanıklılığını artırabilmektedir. Sayısal olarak, L2-norm düzenleme, öngörücü değişkenler arasındaki çoklu doğrusallığı azaltmak için değişkenlere küçük bir gevşek faktör ekleyerek bir işlem yapmaktadır.

Ayrıca, aşırı uyumu azaltmak için L2 norm düzenlemesi kullanılabilir. RFCNN'lerin performansı, sentetik veriler ve Makine Öğrenimi (MÖ) veri setlerinden elde edilen kamuya açık veriler üzerinde yapılan deneylerle doğrulanmıştır, bu da SV'ye dayalı HFCM veya SV'ye dayalı FCM ile modelin sağlamlığının artırılması sayesinde RFCNN'lerin diğer yöntemlere üstünlüğünü göstermektedir.

Bu çalışmanın temel motivasyonları, geleneksel HFCM veya FCM kümeleme yöntemlerinin yaygın kullanımından kaynaklanan, gürültü ve aykırı değerler de dahil olmak üzere ilişkisiz verilerden kaynaklanan FCNN'lerin performansında yaşanan kötüleşme sorununu ele almak ve tahmin görevlerinde geleneksel FCNN'lerde gözlenen sınırlı sağlamlığı ele almaktır. Ayrıca, çalışma geliştirilen

modelleri farklı veri kümeleri kullanarak test etmeyi ve modelleri değerlendirmek için sonuçlarını karşılaştırmayı amaçlamaktadır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Vektör tabanlı kümeleme teknikleri

SV tabanlı kümeleme, veri kümesini belirli sayıda küme veya küme merkezi etrafında gruplandırarak yapılan bir işlemdir. Bu işlem, her veri noktasının bir kümeye atanmasını sağlar. Bu yöntem, geleneksel K-Means gibi kümeleme yöntemlerinden farklı olarak, her veri noktasına bir ağırlık atamak yerine, sadece belirli veri noktalarını seçerek kümeleme işlemini gerçekleştirmektedir.

Veri kümeleme, veri analizinde önemli bir rol oynayan bir tekniktir. Veri setini anlamlı gruplara bölmek için kullanılan bu teknik, veri setindeki yapıları ve ilişkileri belirlemeye yardımcı olur. Ancak, geleneksel kümeleme yöntemleri, özellikle gürültü ve aykırı değerler gibi istenmeyen veri unsurlarının etkisi altında kalabilir. Bu durum, kümeleme sonuçlarını ve modelin performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Bu çalışmada, SV tabanlı kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, veri kümeleme işlemlerinde SV'leri kullanarak verileri anlamlı gruplara ayırmayı amaçlamaktadır. SV'ler, veri kümeleme işlemi sırasında belirli veri noktalarını temsil etmekte ve küme merkezlerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

SV tabanlı bulanık kümeleme için amaç fonksiyonu aşağıda (1) gösterilmiştir.

$$J(u, v) = \underset{u, v}{\operatorname{argmin}} \sum_{s=1}^g \sum_{i=1}^c u_{ism} \|x_s - v_i\|^2 \quad (1)$$

Formül 1'de yer alan  $J(u, v)$  formülü,  $c$  kümesindeki her veri noktası için  $s$  sayısındaki grupta bulunan her veri noktasına en yakın  $v$  vektörünün bulunmasını amaçlayan bir fonksiyondur. Bu fonksiyon,  $u$  vektörlerinin kümesini ve  $v$  vektörlerinin kümesini girdi olarak almakta ve  $J(u, v)$  değeri,  $u$  ve  $v$  kümelerinin ne kadar iyi eşleştiğini ölçmektedir.

$$v_i = \frac{\sum_{s=1}^g u_{ism} X_s}{\sum_{s=1}^g u_{ism}} \quad (2)$$

$$u_{is} = \left( \sum_{r=1}^c (\|x_s - v_r\| / \|x_s - v_i\|)^{\frac{2}{m-1}} \right)^{-1} \quad (3)$$

$v_i$  formül 2’de, c kümesindeki her i’inci veri noktası için s sayısındaki gruba ait u vektörlerinin ağırlıklı ortalamasını hesaplamak için kullanılmaktadır. Formül 3’te ise, c kümesindeki her i’inci veri noktasının s’inci gruba ait olma olasılığını hesaplanmıştır. Bu formül, i’inci veri noktasının s’inci gruba ait olma olasılığını, s’inci gruptaki diğer veri noktalarına göre ölçmektedir.

Amaç fonksiyonu, küme merkezlerinin ve üyelik derecelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Üyelik dereceleri, her veri noktasının her küme için hangi derecede o kümeye ait olduğunu belirlerken, küme merkezleri, veri noktalarının kümeleme işlemi sırasındaki referans noktalarını temsil etmektedir.

## 2.2. Sağlam bulanık kümeleme tabanlı sinir ağlarının mimarisi

Önerilen RFCNN’ler üç işleme aşamasıyla uygulanmaktadır. Koşul ve sonuç aşamaları, bulanık kuralların oluşturulması ve ardından analiz edilmesi ile ilgilidir. Toplama aşaması, bir bulanık çıkarım ile ilgilidir. Ayrıca, RFCNN’lerin temel mimarisi üç katmandan oluşmaktadır. Gizli ve giriş katmanları arasındaki bağlantılar, SV tabanlı HFCM (veya SV tabanlı FCM) tarafından güncellenen küme merkezlerini benimsemektedir. Genel anlamda 3 katmandan oluşan mimari aşamada sırasıyla detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

**Giriş Katmanı:** Bu katman, modelin girdi verilerini alır. Her bir girdi, genellikle bir veri noktasını veya bir özelliği temsil etmektedir. Giriş katmanındaki düğümler, girdi verilerini işlemek ve sonraki katmanlara iletmek için kullanılmaktadır.

**Gizli Katmanlar:** Bu katmanlar, giriş verilerinden öğrenilen karmaşık ilişkileri göstermektedir. Sinir ağının genel yapısı ve performansı bu katmanların sayısı ve büyüklüğüne bağlı olabilir. Her gizli katman, birbirine bağlı sinir düğümlerinden oluşmakta ve giriş verilerinden öğrenilen özelliklerin temsilini sağlamaktadır.

**Çıkış Katmanı:** Bu katman, modelin çıktısını üretmektedir. Regresyon problemlerinde, çıkış katmanı genellikle bir sayısal değerdir ve modelin tahminini temsil etmektedir. Sınıflandırma problemlerinde ise, çıkış katmanı genellikle her bir sınıf için bir olasılık dağılımı üretmektedir.

Her veri noktasının her bir kümeye ait olma derecesini ifade eden üyelik derecelerinin hesaplanması formül (4)’te gösterilmiştir.

$$u_{ij} = \left( \sum_{k=1}^c \left( \frac{d_{ik}}{d_{ij}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right)^{-1} \quad (4)$$

Formül 4'te,  $u_{ij}$  veri noktasının  $i$  numaralı küme ile olan üyelik derecesini,  $d_{ij}$  ise veri noktasının  $i$  numaralı küme merkezine olan uzaklığını,  $c$  ise toplam küme sayısını ve  $m$  ise belirlenen bulanıklık parametresini temsil etmektedir.

Üyelik derecelerinin hesaplanmasının ardından, her küme merkezinin güncellenmesi aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m X_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m} \quad (5)$$

Bu formülde,  $v_i$  küme merkezinin yeni konumunu,  $u_{ij}$  ise  $j$  veri noktasının  $i$  kümesine ait üyelik derecesini,  $x_j$  ise  $j$  veri noktasını ve  $m$  ise bulanıklık parametresini göstermektedir.

Kümeleme işleminin optimizasyonunu sağlamak için kullanılan amaç fonksiyonu formül (6)'daki gibi ifade edilebilmektedir.

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m \cdot d_{ij}^2 \quad (6)$$

Formül 6'da,  $J$  amaç fonksiyonunu,  $u_{ij}$  üyelik derecesini,  $d_{ij}$  ise  $i$  küme merkezi ile  $j$  veri noktası arasındaki uzaklığı,  $c$  toplam küme sayısını ve  $n$  veri noktası sayısını ifade etmektedir.

### 2.3. FCNN'nin öğrenme yöntemleri

Bu çalışmada, RFCNN'ler, iki öğrenme mekanizması içermektedir. İlk mekanizma, gizli katmanları oluşturmak için kullanılan SV tabanlı kümeleme teknikleridir. Örneğin SV tabanlı HFCM ve SV tabanlı FCM. Bir regresyon modelinin performansını oluştururken, her bir düğüme karşılık gelen üyelik fonksiyonunun merkezini (aktivasyon fonksiyonu) belirlemek önemlidir ve bunun için SV tabanlı kümeleme teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca, üyelik fonksiyonunun merkezini seçmek için belirli bir kriter yoktur, bu nedenle SV tabanlı kümeleme etkili olmuştur. İkinci mekanizma, gizli ve çıkış katmanları arasındaki bağlantı ağırlıklarının hesaplamak için LSE'dir. L2-norm ile düzenleme, olası aşırı uyumdan kaynaklanan dayanıklılığın bozulmasını azaltabilen küçülme katsayılarını tahmin etmek için uygulanmıştır. Bu çalışmada, önerilen modelin bağlantı ağırlıklarını hesaplamak için LSE kullanılmıştır. Önerilen modelin bağlantı ağırlıklarını tahmin etmek için öğrenme amaç fonksiyonu aşağıdaki (3) gibi hesaplanmaktadır:

$$Loss = arg \min \left\{ \frac{1}{2} [x_w - y]^T [x_w - y] + \lambda w^T w \right\} \quad (3)$$

Burada  $\lambda$ , düzenleme parametresidir. Bu terim, modelin tahminlerinin gerçek değerlerden sapmalarını ölçen bir terimdir.  $x_w$  modelin tahmin ettiği değerleri,  $y$  ise gerçek değerleri temsil etmektedir. Bu ifade, tahminler ile gerçek değerler arasındaki farkın karesini hesaplamaktadır. Modelin karmaşıklığını kontrol etmek ve aşırı uyum (overfitting) problemini azaltmak için kullanılmıştır.  $\lambda$  parametresi, düzenlemenin gücünü kontrol eder.  $w$  vektörü, modelin parametrelerini (ağırlıkları) ifade etmektedir. Bu terim, modelin parametrelerinin büyüklüğünü sınırlamakta ve böylece modelin daha genelleştirilebilir olmasını sağlamaktadır.

### 2.3. Veri Kümesi

Bu çalışmada veri kümesi olarak, göğüs kanseri teşhisi ile ilgili bilgileri içeren Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) (Wolberg vd., 1995) ve İtalya'nın farklı bölgelerinden elde edilen şarapların kimyasal özelliklerini ve bu özelliklerin şarap türlerine göre dağılımını içeren Wine (Aeberhard vd., 1997) veri kümesi kullanılmıştır.

İlk olarak, Dr. William H. Wolberg tarafından 1992'de yayınlanan bu veri kümesi, göğüs kanseri teşhisi konulan hastalardan alınan ince iğne aspirasyon biyopsilerinin sonuçlarını içermektedir. Veri kümesi, farklı özellikleri kullanarak kanserin iyi huylu veya kötü huylu olup olmadığını tespit etmeyi amaçlamaktadır (Wolberg vd., 1995). Veri kümesi 569 örnek ve 30 özellikten oluşmuştur. Her özellik, hücre çekirdeğinden ölçülen belirli bir parametreyi temsil etmektedir ve etiket olarak iyi huylu için 0 kötü huylu için 1 değerleri atanmıştır.

Wine veri kümesi, şarapların türlerini sınıflandırmak için kullanılan kimyasal bileşenlerin analizini içermektedir. İçerik olarak, 178 örnek ve 13 kimyasal özellik yer almaktadır. Her özellik, şarap örneklerinin belirli bir kimyasal bileşenini veya fiziksel özelliğini temsil etmektedir. 3 farklı şarap türü sınıf 1,2,3 şeklinde etiketlenmiştir (Aeberhard vd., 1997).

Literatürdeki çalışmada (Huang vd., 2022) SV'lere dayalı HFCM ve FCM teknikleri ile L2 norm-regülerizasyonu kullanılmıştır. Bizim çalışmamızda ise çeşitli regresyon modelleri (SVR, Rastgele Ağaç (RF), Lineer Regresyon (LR), Karar Ağacı (DT)) uygulanmıştır. Bu çalışmanın amacı, iki farklı veri kümesinde karmaşık ilişkileri modellemek ve daha doğru bir şekilde tahminleme yapabilmek için bulanık kümeleme tabanlı sinir ağı modellerini kullanmaktır. Ayrıca, SV tabanlı kümeleme ve düzenleme tekniklerinin kullanılmasıyla modelin performansı artırıp artırmadığı analiz edilmiştir. Bu çalışmanın bir diğer amacı, literatürde bu

konuda yapılmış çalışmalar ile yürüttüğümüz çalışma sonucu elde edilen modelin başarı skorlarının kıyaslamasını yapmaktır.

### **3. Sonuçlar ve Tartışma**

#### **3.1. Uygulama**

Yapılan çalışmalar, RFCNN'lerin modelleme sürecinde iki adet SV tabanlı kümeleme tekniğinin tasarımını göstermek ve FCNN'lerin modellemesi kullanıldığında çıkış performansını etkili bir şekilde artırmak için yapılmıştır. RFCNN'lerin dayanıklılığı, gürültü eklenmiş test verisi ile incelenmiştir. Ayrıca, SV tabanlı kümeleme ve L2 norm düzenleme ile tasarlanmış RFCNN'ler, SVR, RF, LR, IBK gibi diğer modellere göre daha iyi regresyon performansına sahiptir. İstatistiksel analiz, kök ortalama kare hatası (RMSE) ile ölçülen regresyon performansı ile Friedman testi ve Bonferroni-Dunn testi ile gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada, kullanılan veri kümeleri ve MÖ veri setlerini içermektedir. PI ve E\_PI, eğitim verisi ve test verisi için model performansını temsil etmektedir. RFCNN'lerin başlangıç parametre ayarları Şekil 1'de açıklanmıştır.

Huang'ın çalışması (Huang vd., 2022) ve bu çalışma kıyaslandığında, her iki çalışma da SV'lere dayalı kümeleme tekniklerinin ve L2 norm-regülerizasyonunun RFCNN'lerin performansını artırmada etkili olduğunu göstermiştir. Bu çalışmaların ilişkisi, aynı metodolojilerin farklı veri kümeleri üzerinde uygulanarak, modellerin genel performansının ve dayanıklılığının değerlendirilmesi üzerine kurulmuştur.

#### **3.2. Başarı Değerlendirmesi**

Bu çalışma, iki veri seti üzerinde bulanık kümeleme tabanlı sinir ağı modellemesinin başarısını değerlendirmektedir. Bu RFCNN modellemesi aykırı değerlere karşı ne kadar sağlam olduğunu değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu bağlamda, modelin performansını değerlendirmek için çeşitli başarı metrikleri kullanılmaktadır. İlk olarak, gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki mutlak farkın ortalaması olan Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE) ölçümü yapılmaktadır. Daha sonra, gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki kare farkların ortalaması olan Ortalama Kare Hata (Mean Squared Error, MSE) hesaplanmaktadır. Bununla birlikte, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni ne kadar iyi açıkladığını ölçen R-Kare Skoru ( $R^2$ ) kullanılmaktadır. Modelin tahmin performansını daha iyi anlamak için RMSE de değerlendirme metrikleri arasına eklenmiştir. Ayrıca, anormallik testleri ve doğruluk oranı gibi ek metrikler de kullanılarak modelin genel performansı incelenmektedir. Son olarak, modelin aykırı



değerleri ne kadar iyi işlediğini gösteren Aykırı Değerlerin Oranı değerlendirilmektedir. Bu metrikler, modelin tahmin etme yeteneğini değerlendirmek için kullanılan temel ölçümlerdir (Chai vd., 2014).

Literatürde yapılan çalışmada (Huang vd., 2022) mevcut FCNN'ler ile önerilen RFCNN'ler arasındaki regresyon performansını MPG, NO<sub>x</sub> ve Boston Housing veri kümelerinde gösterilmiştir. Deneysel sonuçları, önerilen RFCNN'lerin geleneksel FCNN'lere göre daha iyi regresyon performansına sahip olduğunu göstermektedir. Her veri kümesi için mevcut FCNN'ler ile önerilen RFCNN'lerin RMSE karşılaştırmasını göstermektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi C (Küme Sayısı),  $\epsilon$  (SVs-parametresi) ve  $\lambda$  (düzenleme parametresi) de dahil olmak üzere optimize edilmiş parametre ayarlarını listelemektedir. Yapılan bu çalışmada da modeller üzerinde aynı parametreler uygulanmıştır. Modelin dayanıklılığı gürültü gibi MÖ veri setleriyle test edilmiştir.

Dataset type	Model SH			Model SF		
	C	$\epsilon$	$\lambda$	C	$\epsilon$	$\lambda$
MPG	6	1.200	0.1	5	0.800	0.1
NOX	6	0.590	0.1	8	0.330	0.1
BOH	6	0.002	0.3	4	0.005	0.3
MIS	4	0.750	0.1	2	0.690	0.1
CON	10	0.008	0.1	10	0.006	0.1
FRI	7	0.018	0.2	8	0.026	0.2
WIZ	10	0.001	0.1	10	0.001	0.1
PYR	8	0.660	0.1	8	0.665	0.1
FR2	10	0.700	0.2	10	0.800	0.2
WIR	4	0.800	0.3	4	0.960	0.3
WIW	4	1.300	0.3	4	1.150	0.3

**Şekil 1.** RFCNN'ler modellemesinde parametre ayarları. Model SH:SV temelli HFCM ile gerçekleştirilen RFCNN'ler; Model SF: SV temelli FCM ile gerçekleştirilen RFCNN'ler (Huang vd., 2022).

Şekil 2'de, önerilen RFCNN'lerde (Model SH ve Model SF) gürültü varlığında daha iyi dayanıklılık elde edilmiştir. L2 norm düzenlemesiyle küçülme tahmincileri aracılığıyla tasarlanan regresyon modelinde, test veri setindeki kayıp fonksiyonunun L2 norm düzenlemesi olmadan daha üstün olduğu görülmektedir.

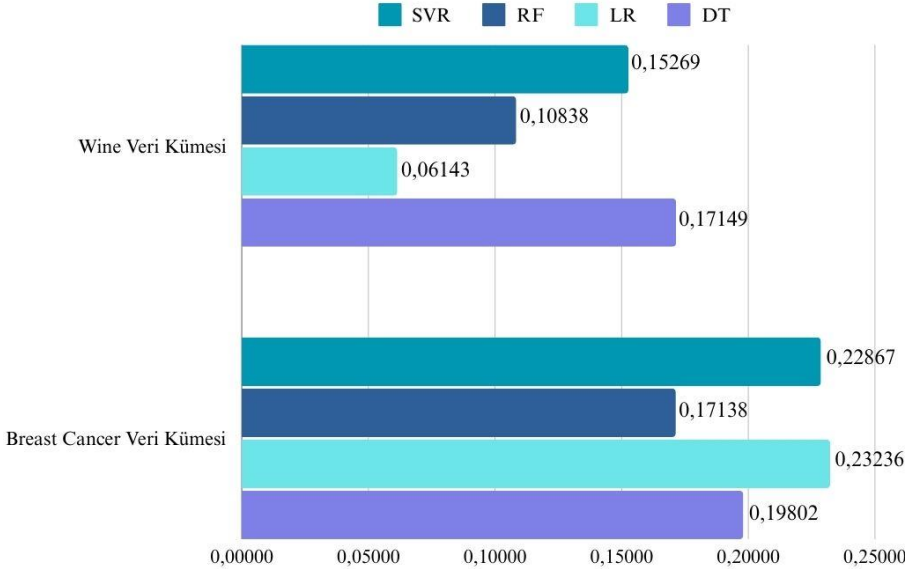
Dataset type	Model H				Model SH			
	5 dB	10 dB	15 dB	Without noise	5 dB	10 dB	15 dB	Without noise
MPG	7.82 ± 4.07	7.54 ± 6.60	5.00 ± 2.44	3.10 ± 0.43	3.75 ± 0.68	3.44 ± 0.50	2.90 ± 0.21	2.70 ± 0.45
BOH	19.08 ± 3.08	12.45 ± 1.91	9.04 ± 2.58	3.84 ± 0.45	7.09 ± 0.96	5.15 ± 0.66	4.32 ± 0.44	3.36 ± 0.60
FRI	8.02 ± 0.42	5.37 ± 0.24	3.63 ± 0.20	1.20 ± 0.08	5.44 ± 0.26	4.09 ± 0.21	2.60 ± 0.13	1.16 ± 0.06
WIR	22.87 ± 3.65	12.47 ± 2.01	8.38 ± 1.28	0.65 ± 0.04	1.55 ± 0.13	1.02 ± 0.06	0.77 ± 0.05	0.57 ± 0.05
WIW	42.28 ± 2.34	34.96 ± 2.81	24.14 ± 1.38	0.74 ± 0.02	1.55 ± 0.07	1.04 ± 0.04	0.85 ± 0.03	0.66 ± 0.03
Dataset type	Model F				Model SF			
	5dB	10dB	15dB	Without noise	5dB	10dB	15dB	Without noise
MPG	11.03 ± 5.49	8.62 ± 4.54	6.40 ± 4.03	2.94 ± 0.47	3.72 ± 0.80	3.30 ± 0.61	2.88 ± 0.48	2.65 ± 0.44
BOH	20.41 ± 3.57	12.33 ± 3.88	9.11 ± 4.04	3.88 ± 0.57	7.06 ± 0.90	4.97 ± 0.59	4.20 ± 0.51	3.34 ± 0.48
FRI	8.39 ± 0.52	5.48 ± 0.31	3.82 ± 0.24	1.89 ± 0.18	5.27 ± 0.25	3.67 ± 0.20	2.63 ± 0.17	1.33 ± 0.10
WIR	23.94 ± 2.86	14.77 ± 2.70	9.81 ± 1.38	0.66 ± 0.04	1.15 ± 0.07	0.86 ± 0.07	0.71 ± 0.06	0.55 ± 0.04
WIW	43.26 ± 3.24	33.93 ± 1.93	23.45 ± 1.73	0.74 ± 0.01	1.37 ± 0.06	0.97 ± 0.03	0.81 ± 0.04	0.65 ± 0.04

**Şekil 2.** RFCNN'ler ile FCNN'ler arasındaki RMSE karşılaştırması (Huang vd., 2022).

Tablo 3'te bu çalışmada uygulanan veri kümelerinin RMSE sonuçları sunulmuştur. Wine veri seti için, LR modeli en düşük RMSE değerine sahiptir, dolayısıyla bu veri kümesinde en iyi performansı göstermiştir.

**Tablo 3.** İki farklı veri kümesi için algoritmaların MSE değerleri.

Algoritma	Wine Veri Kümesi	Breast Cancer Wisconsin Veri Kümesi
SVR	0,15269	0,22867
RF	0,10838	0,17138
LR	0,06143	0,23236
DT	0,17149	0,19802



**Şekil 3.** Veri kümelerinin MSE değerlerinin karşılaştırmalı grafiği.

Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) veri kümesi için, RF modeli en düşük RMSE değerine sahiptir, dolayısıyla bu veri kümesinde en iyi performansı göstermiştir. RMSE ne kadar düşük olursa, model o kadar başarılı kabul edilmektedir. Genel olarak, her iki veri kümesinde de RFCNN'lerin performansı diğer regresyon modelleriyle karşılaştırıldığında oldukça rekabetçi görülmüştür. Ancak bu, spesifik olarak hangi modelin en iyi olduğunu belirlemek için yeterli sayılmamaktadır. Literatürdeki çalışmada (Huang vd., 2022), farklı veri kümelerinde elde edilen RMSE skorları arasından en düşük  $0,10 \pm 0,04$  ve en yüksek  $6,62 \pm 0,53$  skorları elde edilmiştir.

Sonuçlar analiz edildiğinde, bizim çalışmamızın RFCNN yöntemlerinin, literatürde belirtilen yöntemle (Huang vd., 2022) karşılaştırıldığında oldukça rekabetçi olduğunu ve bazı durumlarda daha iyi performans sergileyebileceğini göstermiştir. Özellikle LR yöntemi, Wine veri kümesi üzerinde literatürdeki en iyi sonuçtan daha iyi bir performans sergilemiştir. Ancak, bazı veri kümelerinde literatürdeki en düşük hata oranlarına ulaşmak için ek iyileştirmeler gerekebilmektedir. Breast Cancer Wisconsin veri kümesinde ise, RF yöntemi, literatürdeki en düşük değere oldukça yakın bir performans göstermiştir. Diğer yöntemlerin, kabul edilebilir hata oranları ile genel olarak iyi performans sergilediği görülmüştür.

#### 4. Sonuç

Önerilen çalışmada, RFCNN'lerin performansı, Wine ve Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) gibi veri kümeleri üzerinde diğer regresyon modelleri ile karşılaştırılmıştır. İncelemede, RFCNN'lerinin, SVR, RF, LR ve diğer modellere göre ortalama sıralama açısından farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Önerilen teknikler, sınıflandırma ve geliştirilmiş sınıflandırma görevleri için potansiyel göstermektedir. Literatürdeki (Huang vd., 2022) RFCNN'ler, regresyon modellemesi için SV tabanlı HFCM ve SV tabanlı FCM kullanılmaktadır. Bunlar, giriş değişkenleri, öğrenme yöntemleri, amaç fonksiyonları, dereceler ve çıkış hesaplamalarını içeren SH ve SF modellerinden oluşur. Bu modeller, öğrenme ve optimizasyon için LSE ve L2 norm-düzenleme gibi teknikleri uygulamaktadır.

Wine veri kümesi üzerinde yapılan analizlerde, SVR yöntemi ile 0,1527, RF yöntemi ile 0,1084, LR yöntemi ile 0,0614 ve DT yöntemi ile 0,1715 RMSE değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, literatürdeki (Huang vd., 2022) en düşük RMSE değerinden biraz yüksek olmasına rağmen genel olarak oldukça düşük hata oranları sunmaktadır. Özellikle LR yöntemi, literatürdeki en düşük değerden bile daha düşük bir hata oranı sunarak üstün bir performans sergilemiştir.

Breast Cancer Wisconsin veri kümesi üzerinde yapılan analizlerde ise, SVR yöntemi ile 0,2287, RF yöntemi ile 0,1714, LR yöntemi ile 0,2324 ve DT yöntemi ile 0,1980 RMSE değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, literatürdeki en düşük

değerden daha yüksek olmasına rağmen makul hata oranları sunmaktadır. RF yöntemi, literatürdeki en düşük değere oldukça yakın bir performans göstermiştir.

Genel olarak değerlendirilirse, bu çalışmada kullanılan RFCNN yöntemleri, Huang vd. (Huang vd., 2022) tarafından çalışılan yöntemle karşılaştırıldığında oldukça rekabetçi sonuçlar sunmaktadır. Wine veri kümesi üzerinde LR yöntemi, literatürdeki en iyi sonuçtan daha iyi bir performans sergilerken, diğer yöntemler de düşük hata oranları ile iyi performans sergilemiştir. Breast Cancer Wisconsin veri kümesi üzerinde ise RF yöntemi, literatürdeki en düşük değere yakın performansı göstermiştir. Bu sonuçlar, RFCNN'lerin geniş bir veri kümesi yelpazesinde etkili bir şekilde kullanılabilmesini ve performanslarının iyileştirilebileceğini göstermektedir. Özellikle gürültü ve aykırı değerlere karşı daha dayanıklı olan SV'lere dayalı HFCM ve FCM teknikleri ile L2 norm-regülerizasyonunun kullanılması, modelin genel sağlamlığını ve tutarlılığını artırarak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

İki çalışma arasındaki teknik ve performans değerlendirmeleri, RFCNN'lerin gürültüye ve aykırı değerlere karşı dayanıklı olduğunu ve geniş bir veri kümesi yelpazesinde etkili bir şekilde kullanılabilmesini göstermiştir. Literatürdeki çalışmanın bulguları, bu çalışmadaki bazı modellerin performansını doğrular niteliktedir. Ancak, veri kümelerinin nicelik ve nitelik farklılığı ile kullanılan yöntemlerin farklılığı, tam manada kıyaslama noktasında ek çalışmalar gerektirebilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada, SV tabanlı kümeleme ve düzenleme tekniklerinin kullanıldığı RFCNN modellerinin regresyon performansını artırdığı gösterilmiştir. Gürültülü veri setlerinde ve karmaşık ilişkilerin olduğu veri kümelerinde RFCNN'lerin daha iyi dayanıklılığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, geleneksel FCNN'lerle karşılaştırıldığında RFCNN'lerin regresyon performansının daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen modelin başarı skorları, farklı veri kümelerinde yapılan karşılaştırmalarla doğrulanmış ve literatürdeki benzer çalışmalara göre rekabetçi bulunmuştur. Bu çalışma, YZ alanında bulanık kümeleme tabanlı sinir ağı modellerinin regresyon problemlerinde etkili bir şekilde kullanılabilmesini ve performanslarının optimize edilmesi için SV tabanlı kümeleme ve düzenleme tekniklerinin kullanılabilmesini göstermektedir.

Bu çalışmanın eksik yönleri olarak, literatürdeki modellere göre çok daha az parametrenin kullanılmış olması ve veri kümesinin daha kısıtlı olmasıdır. Gelecek çalışmalarda veri kümesinin artırılması ve başarı metriklerinin çoğaltılması hedeflenmektedir.

## Referanslar

- Aeberhard, Stefan and Forina, M. (1991). Wine. UCI Machine Learning Repository. <https://doi.org/10.24432/C5PC7J>.
- Ahmed, I., Jeon, G., & Piccialli, F. (2022). From Artificial Intelligence to Explainable Artificial Intelligence in Industry 4.0: A Survey on What, How, and Where. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(8), 5031-5042. doi:10.1109/TII.2022.3146552.
- Chai, T. and Draxler, R. R. (2014), Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature, *Geosci. Model Dev.*, 7, 1247–1250, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>.
- Chicco, D. (2021). Siamese Neural Networks: An Overview. In H. Cartwright (Ed.), *Artificial Neural Networks* (pp. xx-xx). *Methods in Molecular Biology*, vol. 2190. Humana: New York, NY. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0826-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0826-5_3).
- Huang, H., Oh, S. K., Wu, C. K., & Pedrycz, W. (2022). Fuzzy clustering based neural networks modelling reinforced with the aid of support vectors-based clustering and regularization technique. *Neurocomputing*, 482, 139-153.
- Nápoles, G., Jastrzebska, A., Grau, I., & Salgueiro, Y. (2024). Backpropagation through time learning for recurrence-aware long-term cognitive networks. *Knowledge-Based Systems*, 295, 111825. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111825>.
- Pratama, M., Lughofer, E., Er, M. J., Anavatti, S., & Lim, C.-P. (2017). Data driven modelling based on Recurrent Interval-Valued Metacognitive Scaffolding Fuzzy Neural Network. *Neurocomputing*, 262, 4-27. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.10.093>.
- Sahu, S. K., Mohapatra, D. P., Rout, J. K., Sahoo, K. S., Pham, Q.-V., & Dao, N.-N. (2022). A LSTM-FCNN based multi-class intrusion detection using scalable framework. *Computers and Electrical Engineering*, 99, 107720. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.107720>.
- Wolberg, William, Mangasarian, Olvi, Street, Nick, and Street, W. (1995). Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic). UCI Machine Learning Repository. <https://doi.org/10.24432/C5DW2B>.

## 11.Bölüm

### Uzman Modeller Topluluğu: Çok Sınıflı Problemlerde İşbirlikçi Çözüm Stratejisi

**Musa ATAŞ<sup>1</sup>**  
**Bashar ALHAJAHMAD<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup> Prof. Dr.; Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.  
[musa.atas@siirt.edu.tr](mailto:musa.atas@siirt.edu.tr) ORCID No: 0000-0002-1214-3127

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi.; Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.  
[bashar.ahmad@siirt.edu.tr](mailto:bashar.ahmad@siirt.edu.tr) ORCID No: 0009-0009-3455-7206

## 1- ÖZET

Bu kitap bölümü, çok sınıflı makine öğrenmesi problemlerinde sınıflandırma performansını artırmak için geliştirilen yenilikçi bir yaklaşım olan Uzman Modeller Topluluğu'nu ele almaktadır. Geleneksel monolitik model yaklaşımının, özellikle büyük ölçekli ve çok sınıflı problemlerde karşılaştığı zorluklar vurgulanarak, bu yeni metodun geliştirilme nedenleri açıklanmaktadır. Uzman Modeller Topluluğu, her bir sınıf için özelleşmiş; ilki ilgili sınıf diğeri de o sınıfın dışındakilerini temsil eden ikili (binary) sınıflandırıcılardan meydana gelen bir sistemdir. Bu yaklaşımda, her model gelen veri için bir güven skoru üretir. Sistem, test aşamasında gelen bir girdi için tüm uzman modellere danışır. İlk etapta, belirli bir eşik değerin üzerinde güven skoru üreten modeller seçilir. Ardından, bu seçilen modeller arasında en yüksek güven skoruna sahip olanın tahmini nihai karar olarak kabul edilir. Bölümde, bu yaklaşımın teorik temelleri, güven skoru hesaplama yöntemleri, optimal eşik değeri belirleme stratejileri ve uygulama metodolojisi detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Veri seti olarak Plants-99 ve küçültülmüş MNIST veri setleri üzerinde yapılan kapsamlı deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Geleneksel monolitik model ile karşılaştırıldığında, Uzman Modeller Topluluğu'nun özellikle geri çağırma (recall) skorunda %5 ila %10 arasında bir iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir. Yaklaşımın güçlü yönleri arasında, özellikle küçük veri setlerinde ve çok sınıflı problemlerde gösterdiği yüksek performans, yeni sınıflar ekleme veya çıkarma konusundaki esnekliği, büyük bir modelin tekrardan eğitilmesine gerek duymaksızın her bir sınıf için özelleşmiş modeller sayesinde sağladığı hassas sınıflandırma yeteneği bulunmaktadır. Bununla birlikte, çıkarım süresinin geleneksel modellere göre daha uzun olması gibi dezavantajları da tartışılmaktadır. Çalışma, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının gelecekteki potansiyel uygulamaları ve geliştirme alanları üzerine bir tartışma ile sonlanmaktadır. Özellikle, gerçek zamanlı uygulamalar için çoklu iş parçacığı (multi-threading) kullanımı ve güven skoru kalibrasyonu gibi optimizasyon önerileri sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Makine Öğrenmesi, Yapay Zeka, Uzman Modeller Topluluğu, Çok Sınıflı Sınıflandırma, Meta-Öğrenme, İşbirlikçi Makine Öğrenmesi

## 1. GİRİŞ

Yapay zeka, insan zekasını taklit etmeye çalışan ve giderek daha karmaşık görevleri yerine getirebilen sistemlerin geliştirilmesini amaçlayan bir bilim dalıdır. Son yıllarda, yapay zeka teknolojilerindeki ilerlemeler neticesinde hemen hemen her alanda devrim niteliğinde değişiklikler yaşanmıştır (Russell & Norvig, 2020). Özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme alanlarındaki gelişmeler, yapay zekanın pratik uygulamalarını önemli ölçüde genişletmiştir (LeCun et al., 2015). Yapay zeka, sağlık hizmetlerinden finansa, eğitimden otonom araçlara kadar çeşitli alanlarda aktif olarak kullanılmaktadır. Örneğin, sağlık sektöründe yapay zeka destekli sistemler, hastalık teşhisinde doktorlara yardımcı olmakta ve bazı durumlarda insan uzmanlardan daha yüksek doğruluk oranları elde etmektedir (Esteva et al., 2017). Yapay zeka ve makine öğrenmesi teknikleri, görüntü işleme ve bilgisayarlı görü alanlarında da önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Örneğin, Ataş (2023a), diyabetik retinopati görüntülerinin sentezlenmesinde derin evrişimli GAN (Generative Adversarial Network) ve en küçük kareler GAN'larının performansını karşılaştırmıştır. Bu tür çalışmalar, tıbbi görüntüleme alanında veri artırma ve model eğitimi için yeni olanaklar sunmaktadır. Benzer şekilde, Ataş (2024), derin evrişimli GAN'larda gizli uzay vektörünün hayvan yüzleri üretmedeki etkisini incelemiştir. Bu çalışma, GAN'ların görüntü üretme kabiliyetlerini daha iyi anlamaya yönelik önemli bir adımdır. Ayrıca, Ataş (2023b), yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden bina segmentasyonunda Jaccard-Dice katsayısının performansını değerlendirmiştir, bu da görüntü segmentasyonu alanında önemli bir katkı sağlamıştır. Finans sektöründe, makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak geliştirilen risk değerlendirme modelleri, kredi kararlarının doğruluğunu artırmış ve finansal suistimallerin tespitinde önemli rol oynamıştır (Bahrammirzaee, 2010).

Yapay zekanın bir alt dalı olan makine öğrenmesi, veri temelli öğrenerek performansını artıran bilgisayar sistemlerini ifade eder (Mitchell, 1997). Makine öğrenmesi, denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme gibi çeşitli alt bölümlere ayrılır (Sutton & Barto, 2018). Denetimli öğrenme, etiketli veri kullanarak bir modelin eğitilmesini içerir ve sınıflandırma ile regresyon problemlerinde yaygın olarak kullanılır (Hastie et al., 2009). Sınıflandırma, makine öğrenmesinin en temel ve yaygın uygulamalarından biridir. Geleneksel sınıflandırma algoritmaları arasında Destek Vektör Makineleri (SVM) (Cortes & Vapnik, 1995), Karar Ağaçları (Quinlan, 1986) ve Yapay Sinir Ağları (ANN) (McCulloch & Pitts, 1943) bulunmaktadır. Bu algoritmalar, görüntü tanıma (Krizhevsky et al., 2012),



doğal dil işleme (Collobert & Weston, 2008) ve biyoinformatik (Larranaga et al., 2006) gibi çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmıştır.

Ancak, tek bir sınıflandırma modelinin karmaşık problemleri çözmede yetersiz kalabileceği durumlar vardır. Bu noktada, topluluk öğrenme (ensemble learning) yöntemleri devreye girer. Topluluk öğrenme, birden fazla modelin tahminlerini birleştirerek daha güçlü bir tahmin elde etmeyi amaçlar (Dietterich, 2000). Random Forest (Breiman, 2001), Gradient Boosting (Friedman, 2001) ve AdaBoost (Freund & Schapire, 1997) gibi ensemble yöntemler, birçok uygulamada tek modellere göre daha iyi performans göstermiştir. Lazy (tembel) öğrenme ise, eğitim aşamasında herhangi bir model oluşturmayıp, tahmin aşamasında veri setini kullanan bir yaklaşımdır. K-En Yakın Komşu (KNN) algoritması (Cover & Hart, 1967), lazy öğrenmenin en bilinen örneğidir. Bu yaklaşım, özellikle veri setinin sürekli güncellenmesi gereken durumlarda avantajlı olabilir. Son yıllarda, derin öğrenme alanındaki gelişmeler, makine öğrenmesi performansını önemli ölçüde artırmıştır. Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN) (LeCun et al., 1998) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağları (Hochreiter & Schmidhuber, 1997) gibi derin öğrenme mimarileri, görüntü ve dizi verisi işlemede kayda değer sonuçlar elde etmiştir.

Bununla birlikte, geleneksel makine öğrenmesi ve derin öğrenme yaklaşımlarının hala aşması gereken bazı önemli zorluklar vardır. Bu zorluklardan biri, modellerin "bilmiyorum" diyebilme yeteneğinin olmamasıdır. Klasik sınıflandırma modelleri, eğitildikleri sınıflar dışında bir girdi ile karşılaştıklarında bile bir tahmin yapmak zorunda kalırlar. Bu durum, özellikle güvenlik kritik uygulamalarda veya tıbbi teşhis sistemlerinde ciddi sorunlara yol açabilir (Hendrycks & Gimpel, 2017). Ayrıca, büyük ölçekli çok sınıflı problemlerde, sınıf sayısı arttıkça modelin performansı genellikle düşer. Bu, kısmen kategorik çapraz entropi kayıp fonksiyonunun sınıflar arası ve sınıf içi ayrımı yapmakta zorlanmasından kaynaklanır (Zhu et al., 2019). Örneğin, ImageNet (Deng et al., 2009) gibi 1000 sınıflı bir veri setinde, en son teknoloji modellerin bile hata oranları MNIST (LeCun et al., 1998) gibi daha küçük veri setlerine kıyasla çok daha yüksektir. Bu zorlukları aşmak için, araştırmacılar çeşitli yaklaşımlar önermiştir. Örneğin, açık set tanıma (open-set recognition) (Scheirer et al., 2013) ve yenilik tespiti (novelty detection) (Pimentel et al., 2014) gibi teknikler, bilinmeyen sınıfları tespit etmeye çalışır. Ancak bu yaklaşımlar genellikle karmaşık ve hesaplama açısından maliyetlidir.

Diğer bir önemli konu, modellerin belirsizliğini doğru bir şekilde tahmin edebilmesidir. Gal ve Ghahramani (2016), Bayesian derin öğrenme

yöntemleri kullanarak model belirsizliğini tahmin etmeye çalışmışlardır. Benzer şekilde, Lakshminarayanan ve diğerleri (2017) derin ensemble yöntemleri kullanarak tahmin belirsizliğini ölçmeyi önermişlerdir. Bu bağlamda, bu çalışmada "Uzman Modeller Topluluğu" adını verdiğimiz yeni bir yaklaşım öneriyoruz. Bu yaklaşım, her bir sınıf için özelleşmiş ikili sınıflandırıcılardan oluşan bir sistem kullanır. Her model, gelen veri için bir güven skoru üretir ve sistem, belirli bir eşik değerin üzerinde güven skoru üreten modeller arasından en yüksek skora sahip olanın tahminini kabul eder. Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı, ensemble öğrenme ve uzman sistemlerin (expert systems) (Jackson, 1998) bazı özelliklerini birleştirerek, çok sınıflı büyük ölçekli problemlerde daha etkili bir çözüm sunmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle veri setinin sürekli genişlediği ve yeni sınıfların eklendiği dinamik senaryolarda daha avantajlı olabilir.

Önerdiğimiz yaklaşımın başlıca katkıları şunlardır:

- Modellerin "bilmiyorum" diyebilme yeteneği: Eşik değerin altında kalan güven skorları, modelin o girdi hakkında yeterince emin olmadığını gösterir. Bu özellik, Attenberg ve diğerlerinin (2015) vurguladığı gibi, gerçek dünya uygulamalarında kritik öneme sahiptir.
- Yüksek hassasiyet: Her sınıf için özelleşmiş modeller, ilgili sınıfın özelliklerini daha iyi öğrenebilir. Bu, özellikle nadir sınıflar için performansı artırabilir (He & Garcia, 2009).
- Esneklik: Yeni sınıflar kolayca eklenebilir veya çıkarılabilir, bu da sürekli öğrenme (continual learning) senaryolarına uygunluk sağlar (Parisi et al., 2019).
- Performans artışı: Özellikle geri çağırma (recall) skorunda %5 ila %10 arasında iyileşme sağlanmıştır. Bu, özellikle dengesiz veri setlerinde önemli bir avantaj sağlar (Chawla et al., 2002).
- Güvenilirlik: Güven skoru tabanlı karar mekanizması, tahminlerin güvenilirliğini artırır. Bu, Jiang ve diğerlerinin (2018) vurguladığı gibi, model yorumlanabilirliği açısından önemlidir.

Bu bölümün geri kalanında, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının teorik temelleri, uygulama metodolojisi ve deneysel sonuçları detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Ayrıca, bu yaklaşımın çeşitli alanlardaki potansiyel uygulamaları ve gelecekteki araştırma yönleri tartışılacaktır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, önerilen Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının detayları, kullanılan veri setleri ve deneysel kurulum açıklanacaktır.

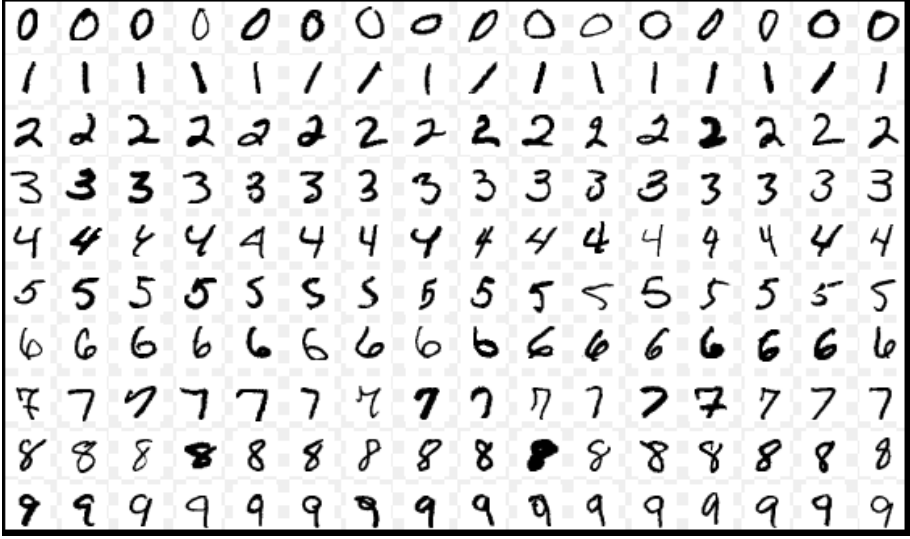
### 2.1. Veri Setleri

Çalışmamızda iki farklı veri seti kullanılmıştır:

- **Plants-99 Veri Seti:** Bu veri seti, 99 farklı bitki türünü içermektedir. Veri seti Kaggle platformundan indirilmiştir (<https://www.kaggle.com/muhammadjawad1998/plants-dataset99-classes>). Veri seti eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç alt kümeye ayrılmıştır. Her bir sınıf için ortalama 133 eğitim, 15 doğrulama ve 53 test görüntüsü bulunmaktadır. Şekil-1 Plants-99 veri setinden birkaç imgeyi ve ait olduğu sınıfı göstermektedir.
- **Küçültülmüş MNIST Veri Seti:** Standart MNIST veri setinin boyutu 1/10 oranında küçültülerek oluşturulmuştur. Bu veri seti, önerilen yaklaşımın daha küçük veri setlerindeki performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. MNIST veri setindeki imgeler 28x28 çözünürlüktedir. Şekil-2’de, MNIST veri setini oluşturan imgeler matris formunda gösterilmiştir.



Şekil 1. Plants-99 veri setinde bulunan (soldan sağa doğru) agapanthus, asparagus, daisy ve lily flower sınıfına ait görüntüler



Şekil 2. MNIST veri setindeki el yazısı imgeler

## 2.2. Model Mimarisi

Çalışmamızda, hafif ve etkili bir model olması nedeniyle MobileNetV2 transfer öğrenme modeli kullanılmıştır. MobileNetV2'nin yoğun (dense) katmanı çıkarılmış ve özelleştirilmiş eğitim için hazır hale getirilmiştir.

### Uzman Modeller Topluluğu Yaklaşımı

Geleneksel "Fat Model" yaklaşımının aksine, önerdiğimiz Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı şu şekilde çalışmaktadır:

- Her sınıf için ayrı bir ikili sınıflandırıcı oluşturulur.
- Her model, kendi uzmanlık alanında gelen veriye bir güven skoru atar.
- Test aşamasında, tüm modeller gelen veriyi değerlendirir.
- Belirli bir eşik değerinde güven skoru üreten modeller seçilir.
- Seçilen modeller arasından en yüksek güven skoruna sahip olanın tahmini kabul edilir.

## 2.3. Eğitim Süreci

Eğitim süreci iki aşamada gerçekleştirilmiştir:

- İlk aşama: CNN katmanı tamamen dondurulmuş ve sadece yoğun katmanda öğrenme gerçekleştirilmiştir. Bu aşama 10 epoch sürmüştür.
- İkinci aşama (İnce ayar): CNN katmanının son 100 katmanı çözülmüş ve öğrenme oranı 1/10 oranında azaltılmıştır.

## 2.4. Değerlendirme Metrikleri

Modelin performansını değerlendirmek için temel olarak geri çağırma (recall) skoru kullanılmıştır. Geri çağırma skoru, özellikle dengesiz veri setlerinde ve yanlış negatif sonuçların kritik olduğu durumlarda önemli bir metriktir.

Bu bölümde açıklanan materyal ve yöntemler, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının uygulanması ve değerlendirilmesi için temel oluşturmaktadır. Bir sonraki bölümde, bu yaklaşımın deneysel sonuçları ve geleneksel yöntemlerle karşılaştırılması sunulacaktır.

## 3. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, önerilen Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının performansı, geleneksel monolitik model yaklaşımıyla karşılaştırmalı olarak sunulacaktır. Deneyler, Plants-99 ve küçültülmüş MNIST veri setleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

### 3.1. Plants-99 Veri Seti Üzerindeki Sonuçlar

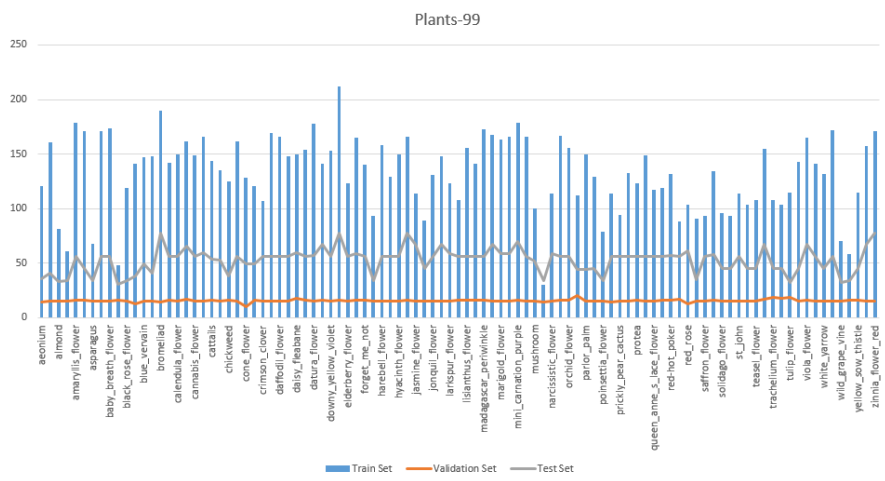
Plants-99 veri seti üzerinde yapılan deneylerde, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı ile geleneksel monolitik model karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1:** Plants-99 veri seti üzerinde model performansları

Model	Ortalama Geri Çağırma (Recall) Skoru
Monolitik Model	0.82
Uzman Modeller Topluluğu	0.96

Tablo 1'de görüldüğü gibi, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı, monolitik modele kıyasla ortalama geri çağırma skorunda %14'lük bir artış sağlamıştır. Bu sonuç, önerilen yaklaşımın özellikle çok sınıflı problemlerde daha etkili olduğunu göstermektedir.

Şekil 3'te, her bir bitki sınıfı için monolitik model ve Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının geri çağırma skorları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Plants-99 veri setinde sınıf bazında geri çağırma (recall) skorları karşılaştırması

Şekil 3'ten görülebileceği gibi, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı, neredeyse tüm sınıflarda monolitik modele göre daha iyi performans göstermiştir. Özellikle bazı zorlu sınıflarda, performans farkı daha belirgin hale gelmiştir.

### 3.2. Küçültülmüş MNIST Veri Seti Üzerindeki Sonuçlar

Küçültülmüş MNIST veri seti üzerinde yapılan deneylerin sonuçları Tablo 2'de sunulmuştur.

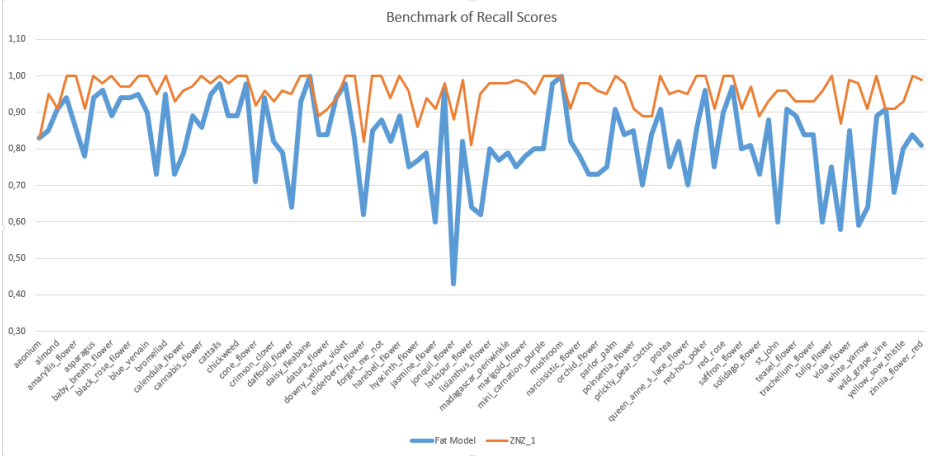
**Tablo 2:** Küçültülmüş MNIST veri seti üzerinde model performansları

Model	Ortalama Geri Çağırma (Recall) Skoru
Monolitik Model	0.94
Uzman Modeller Topluluğu	0.97

Küçültülmüş MNIST veri setinde, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı monolitik modele göre %3'lük bir iyileşme sağlamıştır. Bu sonuç, önerilen yaklaşımın daha küçük ve dengeli veri setlerinde de etkili olduğunu göstermektedir.

### 3.3. Güven Skoru Analizi

Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının bir diğer önemli özelliği, modellerin ürettiği güven skorlarıdır. Şekil 4'te, doğru ve yanlış tahminler için güven skorlarının dağılımı gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Plants-99 veri seti bağlamında doğru ve yanlış tahminler için güven skoru dağılımı

Şekil 4'ten de görülebileceği gibi, doğru tahminler genellikle daha yüksek güven skorlarına sahiptir. Bu durum, yaklaşımımızın güvenilir tahminler üretme yeteneğini göstermektedir.

### 3.4. Hesaplama Zamanı Analizi

Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının bir dezavantajı, çıkarım süresinin monolitik modele göre daha uzun olmasıdır. Tablo 3'te, her iki yaklaşımın ortalama çıkarım süreleri karşılaştırılmıştır.

**Tablo 3:** Ortalama çıkarım süreleri (milisaniye cinsinden)

Model	Plants-99	Küçültülmüş MNIST
Monolitik Model	15 ms	5 ms
Uzman Modeller Topluluğu	45 ms	20 ms

Görüldüğü gibi, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı daha uzun çıkarım sürelerine sahiptir. Ancak, bu dezavantaj, özellikle yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda, elde edilen performans artışıyla dengelenebilir.

Bu deneysel sonuçlar, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının, özellikle çok sınıflı ve zorlu veri setlerinde, geleneksel monolitik modellere göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

## 4. TARTIŞMA

DeneySEL sonuçlar, önerilen Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının geleneksel monolitik modellere kıyasla önemli avantajlar sağladığını göstermiştir. Bu bölümde, elde edilen sonuçların detaylı bir analizi yapılacak ve yaklaşımın güçlü yönleri ile sınırlamaları tartışılacaktır.

### 4.1. Performans Analizi

Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı, hem Plants-99 hem de küçültülmüş MNIST veri setlerinde monolitik modele göre daha yüksek geri çağırma (recall) skorları elde etmiştir. Bu iyileşme, özellikle Plants-99 gibi çok sınıflı ve daha zorlu veri setlerinde daha belirgin hale gelmiştir. Bu durumun muhtemel nedenleri şunlar olabilir:

- Özelleşmiş Modeller: Her bir sınıf için ayrı bir model eğitilmesi, her modelin kendi sınıfına özgü özellikleri daha iyi öğrenmesini sağlamıştır.
- Güven Skoru Mekanizması: Yüksek güven skoru gerektiren karar mekanizması, yanlış pozitif oranını azaltmıştır.
- "Bilmiyorum" Yeteneği: Modellerin düşük güven skorlarında tahmin yapmaktan kaçınması, genel doğruluğu artırmıştır.

Bu sonuçlar, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının potansiyelini göstermektedir.

### 4.2. Hesaplama Maliyeti ve Zaman Karmaşıklığı

Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının en belirgin dezavantajı, çıkarım süresinin daha uzun olmasıdır. DeneySEL sonuçlarda görüldüğü gibi, önerilen yaklaşım monolitik modele göre yaklaşık 3 kat daha fazla çıkarım süresi gerektirmektedir. Bu, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda bir sorun teşkil edebilir. Ancak, yüksek doğruluk gerektiren ve zaman kısıtlamasının daha az önemli olduğu uygulamalarda, bu dezavantaj kabul edilebilir olabilir. Örneğin, tıbbi teşhis veya güvenlik uygulamalarında, doğruluk çıkarım hızından daha kritik olabilir.

### 4.3. Ölçeklenebilirlik ve Esneklik

Önerilen yaklaşımın bir diğer avantajı, yeni sınıflar eklenirken veya mevcut sınıflar çıkarılırken gösterdiği esnekliktir. Geleneksel monolitik modellerde, yeni bir sınıf eklenmesi tüm modelin yeniden eğitilmesini gerektirirken, Uzman Modeller Topluluğu'nda sadece yeni sınıf için bir



model eğitilmesi yeterlidir. Bu özellik, sürekli değişen ve gelişen veri setleri için önemli bir avantaj sağlar. Bununla birlikte, sınıf sayısı çok fazla arttığında, toplam model boyutu ve çıkarım süresi de artacaktır. Bu durum, çok yüksek sayıda sınıf içeren problemlerde bir sınırlama oluşturabilir.

#### **4.4. Model Yorumlanabilirliği**

Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı, her bir sınıf için ayrı bir model kullanması nedeniyle, monolitik modellere göre daha yorumlanabilir sonuçlar üretme potansiyeline sahiptir. Her bir uzman modelin kararları ayrı ayrı incelenebilir, bu da hata analizi ve model iyileştirme süreçlerini kolaylaştırabilir. Ancak, modeller arasındaki etkileşimlerin ve nihai kararın nasıl verildiğinin anlaşılması hala karmaşık olabilir. Bu nedenle, modelin kararlarını daha şeffaf hale getirmek için ek açıklanabilirlik teknikleri gerekebilir.

#### **4.5. Veri Seti Bağımlılığı**

Deneysel sonuçlar, önerilen yaklaşımın performansının veri setinin özelliklerine bağlı olduğunu göstermektedir. Plants-99 veri setinde elde edilen iyileşme, küçültülmüş MNIST veri setine göre daha belirgindir. Bu durum, yaklaşımın özellikle zorlu ve dengesiz veri setlerinde daha etkili olabileceğini göstermektedir. Ancak, daha fazla veri seti üzerinde testler yapılması, yaklaşımın genelleştirilebilirliğini daha iyi anlamak için gereklidir.

Sonuç olarak, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı, özellikle çok sınıflı ve zorlu sınıflandırma problemlerinde umut verici sonuçlar göstermiştir. Bununla birlikte, hesaplama maliyeti ve ölçeklenebilirlik konularında bazı sınırlamalara sahiptir. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek ve yaklaşımın potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmak için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışması gerekmektedir.

### **SONUÇ**

Bu çalışmada, çok sınıflı sınıflandırma problemleri için yeni bir yaklaşım olan Uzman Modeller Topluluğu önerilmiş ve incelenmiştir. Önerilen yaklaşım, her bir sınıf için özelleşmiş modeller kullanarak ve güven skoru tabanlı bir karar mekanizması uygulayarak, geleneksel monolitik modellere göre daha yüksek performans elde etmiştir. Deneysel sonuçlar, Uzman Modeller Topluluğu'nun özellikle Plants-99 ve küçültülmüş MNIST veri setlerinde geri çağırma (recall) skorunu önemli ölçüde artırdığını

göstermiştir. Bu iyileşme, yaklaşımın her bir sınıf için özelleşmiş modeller kullanmasından ve düşük güvenli tahminleri eleme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, önerilen yaklaşımın bazı sınırlamaları da mevcuttur. En belirgin dezavantajı, çıkarım süresinin monolitik modellere göre daha uzun olmasıdır. Ayrıca, çok yüksek sayıda sınıf içeren problemlerde ölçeklenebilirlik sorunları ortaya çıkabilir.

Gelecek çalışmalar için aşağıdaki araştırma yönleri önerilmektedir:

- Hesaplama Verimliliği: Çıkarım süresini azaltmak için paralel işleme teknikleri veya model sıkıştırma yöntemleri araştırılabilir. Özellikle, GPU tabanlı paralel hesaplama teknikleri, çıkarım süresini önemli ölçüde azaltabilir.
- Dinamik Eşik Değeri: Sabit bir eşik değeri yerine, veri setine veya probleme özgü dinamik eşik değerleri belirleyen algoritmalar geliştirilebilir. Bu, modelin farklı zorluktaki sınıflar için adaptif olmasını sağlayabilir.
- Transfer Öğrenme: Uzman modeller arasında bilgi transferi sağlayarak, özellikle az örneğe sahip sınıfların performansı artırılabilir. Bu, veri kısıtlı senaryolarda yaklaşımın etkinliğini artırabilir.
- Çoklu-Modal Veri: Görüntü dışındaki veri türleri (metin, ses, vb.) için Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımının etkinliği incelenebilir. Bu, yaklaşımın uygulama alanlarını genişletebilir.
- Açıklanabilirlik: Modellerin kararlarını daha iyi anlamak ve yorumlamak için açıklanabilir yapay zeka teknikleri entegre edilebilir. Bu, özellikle kritik uygulamalarda modelin güvenilirliğini artırabilir.
- Sürekli Öğrenme: Zaman içinde yeni sınıflar ve örnekler geldikçe modelin performansını koruyacak ve geliştirecek sürekli öğrenme stratejileri geliştirilebilir. Bu, gerçek dünya uygulamalarında modelin uzun vadeli etkinliğini artırabilir.
- Hibrit Yaklaşımlar: Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı ile diğer ensemble öğrenme tekniklerinin (örneğin, Random Forest veya Gradient Boosting) kombinasyonları araştırılabilir. Bu, yaklaşımın güçlü yönlerini diğer tekniklerin avantajlarıyla birleştirebilir.
- Ölçeklenebilirlik İyileştirmeleri: Çok yüksek sayıda sınıf içeren problemler için hiyerarşik model yapıları veya sınıf gruplandırma teknikleri geliştirilebilir. Bu, yaklaşımın daha büyük ölçekli problemlere uygulanabilirliğini artırabilir.

Sonuç olarak, Uzman Modeller Topluluğu yaklaşımı, çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde umut verici sonuçlar üretmiştir. Gelecekteki alışmalar, bu yaklaşımın verimliliğini artırmaya, sınırlamalarını gidermeye ve uygulama alanlarını genişletmeye odaklanmalıdır. Bu sayede, yapay zeka ve makine öğrenmesi alanlarında daha güvenilir, esnek ve performanslı sistemler geliştirilebilir.

## REFERANSLAR

- 1- Attenberg, J., Ipeirotis, P., & Provost, F. "Beat the machine: Challenging humans to find a predictive model's "unknown unknowns"". *Journal of Data and Information Quality (JDIQ)*, 6(1), 1-17, 2015.
- 2- Ataş, İ., "The Effect of Latent Space Vector on Generating Animal Faces in Deep Convolutional GAN: An Analysis", *DUJE*, vol. 15, no. 1, pp. 99–106, 2024, doi: 10.24012/dumf.1393797.
- 3- Ataş, İ., "Comparison of deep convolution and least squares GANs for diabetic retinopathy image synthesis". *Neural Comput & Applic* 35, 14431–14448, 2023a. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08482-4>
- 4- Ataş, İ., "Performance Evaluation of Jaccard-Dice Coefficient on Building Segmentation from High Resolution Satellite Images". *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(1), 100-106, 2023b. <https://doi.org/10.17694/bajece.1212563>.
- 5- Bahrammirzaee, A. "A comparative survey of artificial intelligence applications in finance: artificial neural networks, expert system and hybrid intelligent systems". *Neural Computing and Applications*, 19(8), 1165-1195, 2010.
- 6- Breiman, L. "Random forests". *Machine learning*, 45(1), 5-32, 2001.
- 7- Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. "SMOTE: synthetic minority over-sampling technique". *Journal of artificial intelligence research*, 16, 321-357, 2002.
- 8- Collobert, R., & Weston, J. "A unified architecture for natural language processing: Deep neural networks with multitask learning". In *Proceedings of the 25th international conference on Machine learning*, 160-167, 2008.
- 9- Cortes, C., & Vapnik, V. "Support-vector networks". *Machine learning*, 20(3), 273-297, 1995.
- 10- Cover, T., & Hart, P. "Nearest neighbor pattern classification". *IEEE transactions on information theory*, 13(1), 21-27, 1967.
- 11- Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., & Fei-Fei, L. "Imagenet: A large-scale hierarchical image database". In *2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 248-255, 2009.
- 12- Dietterich, T. G. "Ensemble methods in machine learning". In *International workshop on multiple classifier systems*, 1-15, 2000.

- 13- Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., & Thrun, S. "Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks". *Nature*, 542(7639), 115-118, 2017.
- 14- Freund, Y., & Schapire, R. E. "A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting". *Journal of computer and system sciences*, 55(1), 119-139, 1997.
- 15- Friedman, J. H. "Greedy function approximation: a gradient boosting machine". *Annals of statistics*, 1189-1232, 2001.
- 16- Gal, Y., & Ghahramani, Z. "Dropout as a bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning". In *international conference on machine learning*, 1050-1059, 2016.
- 17- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. "The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction". Springer Science & Business Media, 2009.
- 18- He, H., & Garcia, E. A. "Learning from imbalanced data". *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 21(9), 1263-1284, 2009.
- 19- Hendrycks, D., & Gimpel, K. "A baseline for detecting misclassified and out-of-distribution examples in neural networks". *arXiv preprint arXiv:1610.02136*, 2017.
- 20- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. "Long short-term memory". *Neural computation*, 9(8), 1735-1780, 1997.
- 21- Jackson, P. "Introduction to expert systems". Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1998.
- 22- Jiang, H., Kim, B., Guan, M., & Gupta, M. "To trust or not to trust a classifier". In *Advances in neural information processing systems*, 5541-5552, 2018.
- 23- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. "Imagenet classification with deep convolutional neural networks". *Advances in neural information processing systems*, 25, 1097-1105, 2012.
- 24- Lakshminarayanan, B., Pritzel, A., & Blundell, C. "Simple and scalable predictive uncertainty estimation using deep ensembles". In *Advances in neural information processing systems*, 6402-6413, 2017.
- 25- Larranaga, P., Calvo, B., Santana, R., Bielza, C., Galdiano, J., Inza, I., ... & Robles, V. "Machine learning in bioinformatics". *Briefings in bioinformatics*, 7(1), 86-112, 2006.
- 26- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. "Deep learning". *Nature*, 521(7553), 436-444, 2015.

- 27- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. "Gradient-based learning applied to document recognition". *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278-2324, 1998.
- 28- McCulloch, W. S., & Pitts, W. "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity". *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115-133, 1943.
- 29- Mitchell, T. M. "Machine learning". McGraw-hill, 1997.
- 30- Parisi, G. I., Kemker, R., Part, J. L., Kanan, C., & Wermter, S. "Continual lifelong learning with neural networks: A review". *Neural Networks*, 113, 54-71, 2019.
- 31- Pimentel, M. A., Clifton, D. A., Clifton, L., & Tarassenko, L. "A review of novelty detection". *Signal Processing*, 99, 215-249, 2014.
- 32- Quinlan, J. R. "Induction of decision trees". *Machine learning*, 1(1), 81-106, 1986.
- 33- Russell, S., & Norvig, P. "Artificial intelligence: a modern approach". Pearson, 2020.
- 34- Scheirer, W. J., de Rezende Rocha, A., Sapkota, A., & Boulton, T. E. "Toward open set recognition". *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 35(7), 1757-1772, 2013.
- 35- Sutton, R. S., & Barto, A. G. "Reinforcement learning: An introduction". MIT press, 2018.
- 36- Zhu, Q., Zhang, P., Wang, Z., & Ye, X. "A new loss function for CNN classifier based on predefined evenly-distributed class centroids". *IEEE Access*, 7, 10888-10895, 2019.