

# **DİSİPLİNLERARASI KÖPRÜLER:**

TEMEL VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİNDE  
GÜNCEL DEĞERLENDİRMELER

**EDİTÖRLER:**

DOÇ. DR. ZEYNEL BAŞIBÜYÜK

DOÇ. DR. TAYFUN KAYA

**EĞİTİM**  
yayınevi

**DİSİPLİNLERARASI KÖPRÜLER: TEMEL VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİNDE GÜNCEL DEĞERLENDİRMELER**

Editörler: Doç. Dr. Zeynel Başıbüyük, Doç. Dr. Tayfun Kaya

**Yayınevi Grubu Genel Başkanı:** Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)

**Genel Yayın Yönetmeni:** Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)

**Sayfa Tasarımı:** Kübra Konca Nam

**Kapak Tasarımı:** Eğitim Yayınevi Grafik Birimi

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı

**Yayıncı Sertifika No:** 76780

**E-ISBN:** 978-625-385-578-9

1. Baskı, Aralık 2025

**Kütüphane Kimlik Kartı**

**DİSİPLİNLERARASI KÖPRÜLER: TEMEL VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİNDE GÜNCEL DEĞERLENDİRMELER**

Editörler: Doç. Dr. Zeynel Başıbüyük, Doç. Dr. Tayfun Kaya

IV+139 s., 160x240 mm

Kaynakça var, izin yok.

E-ISBN: 978-625-385-578-9

Copyright © Bu kitabın Türkiye'deki her türlü yayın hakkı Eğitim Yayınevi'ne aittir. Bütün hakları saklıdır. Kitabın tamamı veya bir kısmı 5846 sayılı yasanın hükümlerine göre kitabı yayımlayan firmanın ve yazarlarının önceden izni olmadan elektronik/mechanik yolla, fotokopi yoluyla ya da herhangi bir kayıt sistemi ile çoğaltılamaz, yayımlanamaz.

**EĞİTİM**

yayınevi

**Yayınevi Türkiye Ofis:** İstanbul: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Atakent mah. Yasemen sok. No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye

**Konya:** Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye  
+90 332 351 92 85, +90 533 151 50 42  
bilgi@egitimyayinevi.com

**Yayınevi Amerika Ofis:** New York: Egitim Publishing Group, Inc. P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America  
americaoffice@egitimyayinevi.com

**Lojistik ve Sevkiyat Merkezi:** Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye  
sevkiyat@egitimyayinevi.com

**Kitabevi Şubesi:** Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye  
+90 332 499 90 00  
bilgi@egitimkitabevi.com

**İnternet Satış:** www.kitapmatik.com.tr  
bilgi@kitapmatik.com.tr

**EĞİTİM YAYINEVİ**  
**GRUBU**

**EĞİTİM**  
yayınevi

**SALON**  
yayıncıları

**kitapmatik**  
T.C. KÜLTÜR VE TURİZM BAKANLIĞI  
YAYINCILIK GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

**Kitapmatik**  
T.C. KÜLTÜR VE TURİZM BAKANLIĞI  
YAYINCILIK GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

**EĞİTİM**  
kitabevi

## İÇİNDEKİLER

### **BANTLI AGATLARDA BANT GELİŞİM MEKANİZMALARI VE YAPISAL ÇEŞİTLİLİĞİN JEOLOJİK TEMELLERİ .....1**

Meltem Gürbüz

### **BAZI MAVİ RENKLİ SÜSTAŞLARININ FİZİKSEL, KİMYASAL VE GEMOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE DERLEME .....19**

İlkay Kaydu Akbudak

### **GEOPOLİMER BETON VE GELENEKSEL BETONUN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ: MALZEME BİLİMİ, PERFORMANS VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BOYUTLARI .....31**

Serdar Korkmaz

### **SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR YAPI MALZEMESİ OLARAK MAGNEZYUM OKSOSÜLFAT (MOSC) ÇİMENTOSU: KARAKTERİZASYON, MODİFİKASYON VE PERFORMANS..... 47**

Şevki Eren, Gökhan Ekincioglu

### **KONUŞMA DUYGU TANIMA ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI..... 64**

Serkan Keser

### **KIRŞEHİR-KAMAN-KALEHÖYÜK ARKEOLOJİ MÜZESİ ENVANTERİNDEKİ TAŞ, CAM VE ORGANİK TAKI PARÇALARININ ARKEOGEMOLOJİK DEĞERLENDİRMESİ ..... 73**

İlkay Kaydu Akbudak

**RİSK VE FIRSATLARI İLE BÖCEKLER: ROLÜ VE EKONOMİSİ ..... 82**

Tayfun Kaya

**EKONOMİK - SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKLAŞIMLAR İLE METAL KİL ÜRETİMİ VE RENKLENDİRİLMESİ ÜZERİNE DENEYSEL UYGULAMALAR ..... 101**

Meltem Gürbüz

**ATIK DÖKÜM KUMUNUN BETONUN MEKANİK, MİKRO YAPISAL VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ: BİR DERLEME ÇALIŞMASI ..... 113**

Gökhan Ekincioglu

**ANADOLU'DAKİ OFİYOLİTLER İLE İLİŞKİLİ YEŞİL SÜSTAŞLARI.....125**

Zeynel Başbüyük

# BANTLI AGATLARDA BANT GELİŞİM MEKANİZMALARI VE YAPISAL ÇEŞİTLİLİĞİN JEOLOJİK TEMELLERİ

Meltem Gürbüz<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

Bantlı agat türlerini kapsayan kuvars grubu mineralleri yer kabuğunun dörtte üçünü oluşturan tectosilikatların grubunda yer almaktadır. Kuvars minerali, kristal yapılarına göre mikrokristalin veya kriptokristalin kuvars ve makrokristalin kuvars olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Makro kristalin türlerde kristal yapısı gözle görülebilen şeffaf yapıda (Şekil 1) iken mikrokristalin kuvars, çıplak gözle görülemeyen küçük kristallerden oluşan bir kuvars türüdür. Makrokristalin kuvars, kristalin yüzeyine katman katman moleküller eklenerek büyürken kriptokristalin kuvars, silikanın kolloidal sulu çözeltisinden oluşur. Bu kristaller genellikle düzensiz bir yapıya sahiptir. (Brzys, 2010). Mikro kristalin kuvars türü ise taneli ve lifli olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 2). (Lifsel türler ise, mikroskop altında incelendiğinde görülen, uzun ve ince lifli kristal yapılarına sahip bir mineral formudur (Şahin, 2011). Kalsedon (Kaydu Akbudak, vd., 2018; Özbay Candan, vd., 2022), Kantaşı, Krizopras, Karnalyen, Oniks, Sardoniks ve agat lifsel türe aittir.



Kaya Kristali

Ametist

Süt Kuvars

Gül Kuvars

Hayalet Kuvars



Duman Kuvars

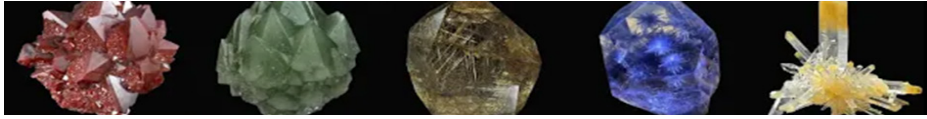
Ametrin

Sitrin

Herkimer Elması

Ajoit Kuvars

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Mersin Üniversitesi, Takı Teknolojisi ve Tasarımı Yüksekokulu, ORCID ID: 0000-0003-2501-0697; e-mail: mgurbuz@mersin.edu.tr



Demirli Kuvars      Prase      Rutil Kuvars      Dumartierit Kuvars      Mango Kuvars

Şekil 1. Makro Kristalin Kuvars Çeşitleri (<https://www.geologyin.com/2024/05/quartz-crystals-colors-types.html>)



Şekil 2. Mikro kristalli Kuvars Türleri

Taneli türler, genellikle küresel kristallerden oluşan kuvars türleridir. Bu mineraller, çeşitli renklere olabilen ve bazen agat benzeri bantlanma özellikleri gösterebilen yapılar oluşturmaktadır (Şahin, 2011). Çört, çakmaktaşı ve jasper (Yüzbaşıoğlu, and Kaydu Akbudak, 2024) taneli türe aittir (Şekil 3).



Şekil 3. Owingsville, BathCounty, Kentucky, USA'den Çört örneği (solda), Dyke Park, Stamford, FairfieldCounty, Connecticut, USA'den çakmaktaşı örneği (ortada ) (<https://www.mindat.org/min-994.html>) SantaClaraCounty, California, USA'den jasperörneği (sağda) (<https://www.mindat.org/min-2082.html>)

Lifsel türler ise, mikroskop altında incelendiğinde görülen, uzun ve ince lifli kristal yapılarına sahip bir mineral formudur (Şahin, 2011). Kalsedon (Kaydu Akbudak, vd., 2018; Özbay Candan, vd., 2022), Kantaşı, Krizopras, Karnalyen, Oniks, Sardoniks ve agat lifsel türe aittir (Şekil 4).



**StirlingBrook, WarrenTownship, SomersetCounty, New Jersey, USA'den karnelyan örneği (<https://www.mindat.org/min-9333.html>) ve Pstan,**



**ZhanaarkaDistrict, UlytauRegion, Kazakhstan'dan kizopraz örneği (<https://www.mindat.org/min-952.html>)**



**Slovakya'dan kalsedon örneği (<https://www.mindat.org/min-960.html>)**



**Yachmenyukhaagatedeposit, Tom' river, Kemerovo Oblast, Russia'dan agat örneği (<https://www.mindat.org/min-51.html>)**



**Minas Gerais, Brezilya'dan Oniks-Akik. Koleksiyon: Kosice Teknik Üniversitesi. (<https://www.geologyin.com/2016/08/types-of-agate-with-photos.html>)**

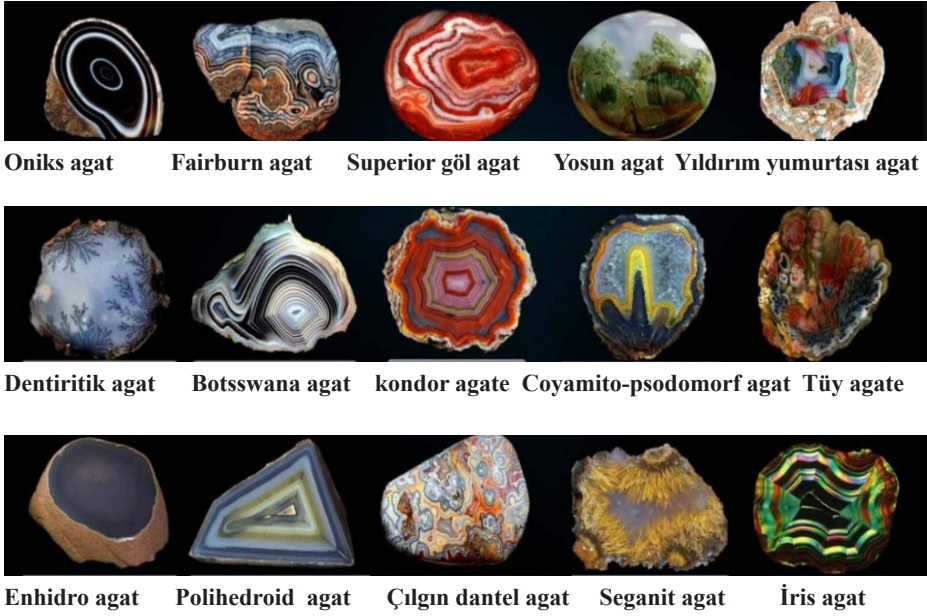


**Heliotrope, yaygın olarak kan taşı olarak bilinir. (<https://www.geologyin.com/2016/04/major-varieties-of-quartz.html>)**

**Şekil 4. Lifsel Mikro kristalli Kuvars Türleri**

Çalışma konumuzu oluşturan agatlar tarihsel süreçte yaklaşık 16.000–20.000 yıl öncesine uzanan kullanım geçmişiyile insanlık tarihinde özel bir yere sahiptir. Adını antik dönemde “Achates” olarak bilinen nehirden alan bu taş; Sümer, Babil, Mısır ve Moğol kültürlerinde mühür, kap, takı ve çeşitli süs eşyalarının yapımında yaygın olarak kullanılmıştır (Hatipoğlu, 2017). Hindistan’ın Khambhat bölgesinde Paleolitik dönemden itibaren agat boncuk üretimi yapıldığı bilinmektedir (Jr, 1982). Avrupa’da agat madenciliği 1497’de Almanya’da başlamış, 19. yüzyılın sonlarına doğru önemli bir endüstri haline gelmiş; 1884’te Sam Dyke tarafından geliştirilen makinelerle agat misketlerin seri üretimi mümkün olmuştur.

Agatlar, dünyanın bir çok bölgesinde bulunan güzel ve büyüleyici mikrokristalin kuvars grubuna ait (Başbüyük, et al., 2023) kalsedon minerallerinin öne çıkan çeşitlerinden olup , doğada riyolit ve bazalt gibi volkanik kayaların boşluklarında gelişen bir süstaşıdır. En belirgin özellikleri, Şekil 5 de görüldüğü gibi farklı renk ve tonlarda gelişen karakteristik yapılarıdır (Brzys, 2010).



Şekil 5. Agat türleri (<https://www.geologyin.com/2016/08/types-of-agate-with-photos.html>)

Fiziksel özellikleri bakımından agat, saydamdan yarı saydama olup . mohs sertliği 6.5–7 ve yüksek dayanıklılıktadır. Yoğunluğu 2.58–2.64 g/cm<sup>3</sup> aralığında değişmekte, kırılma indisi ise 1.53–1.54 arasında yer almaktadır (Başbüyük, et al., 2020).

Klasik olarak volkanik kayalarla ilişkilendirilirler, ancak tortul, metamorfik ve magmatik ortamlarda da bulunabilirler. Birçok derinlemesine

çalışmaya ve gelişen analitik ve araştırma yöntemlerine rağmen, akiklerin büyümesi için gereken silisin kaynağı büyük ölçüde bilinmemekle beraber, agatların jeokimyasal koşullardaki değişimlerin bir yansıması olarak, volkanik kayalardaki gaz boşluklarında uzun süreçler sonucunda meydana geldiği birçok araştırmacı tarafından belirtilmektedir.

## 2. YÖNTEM

Bu çalışma, bantlı agatların mineralojik özellikleri ile jeokimyasal bileşimlerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen kapsamlı bir literatür taramasına dayanmaktadır. Tarama kapsamında, agatların oluşum süreçlerine, silika birikimi mekanizmalarına ve bantlanma modellerine ilişkin veriler; Götze (2009, 2011), Flörke ve ark. (1982), Wang ve Merino (1990), Moxon ve Ríos (2004), Brzys (2010) ve Savva (2021) gibi alanın temel kaynaklarından sistemli biçimde derlenmiştir. Bu çalışmalar incelenerek, hidrotermal sıvı akışı, silika jel dönüşümü ve iz element etkilerini temel alan sınıflandırmalar karşılaştırılmış; ayrıca ritmik birikim, difüzyon-jel süreçleri, mikrobiyal etkiler, boşluk geometrileri ve deformasyon ilişkili bantlanma modelleri değerlendirilmiştir.

## 3. BULGULAR

Agatlar ve türleri ile ilgili ilk raporlar 18. yüzyılda olup kimyasal bileşim, özellik ve oluşumuyla ilgili ciddi bilimsel araştırmalar 19. Yüzyılın ortalarında başlamıştır. Bu sayısız çalışma sonucunda, günümüzde akiklerin oluşumu hakkında çok çeşitli teoriler mevcuttur. .Bantlı agatlar (akikler), mikrokristalin kuvars grubuna ait olup, katmanlı yapılarıyla dikkat çeken yarı değerli taşlardır. Bu bantlı dokuların farklı biçimlerde gelişmesi, oluşum sürecindeki jeokimyasal koşulların değişkenliği, boşluk geometrisi ve çökeltme dinamikleriyle yakından ilişkilidir. Agatlar genellikle volkanik kayalardaki gaz boşluklarında silis bakımından zengin hidrotermal çözeltilerin birikmesiyle oluşmaktadır. Bu süreçte çözeltili bileşimi, sıcaklık, pH ve iyon yoğunluğundaki periyodik değişimler, silisin farklı katmanlarda ve hızlarda çökmesine neden olmaktadır. Dairesel (konsantrik) bantlanma, genellikle küresel veya oval boşluklarda gelişir ve silisli çözeltilerin merkezden dışa doğru çökmesiyle oluşmaktadır. Bu tipe örnek olarak Uruguay ve Brezilya menşeli “Blue LaceAgate” veya Çanakkale-Ayvacak yöresinde görülen damarlı kırmızı akikler verilebilir. Bu örneklerde bantlar, merkezden çevreye düzenli bir şekilde genişleyerek “göz” veya “halka” biçimli desenler oluşturmaktadır. Buna karşılık, yatay (şeritli) bantlanma, çözeltilerin kayalık içi çatlak ve tabakalı boşluklarda yerçekimi etkisiyle taban boyunca çökmesi sonucu oluşmaktadır. Botswana Agatı gibi örneklerde, bantlar paralel ve düzenli şeritler halinde gelişmektedir. Bu taşlarda demir, mangan ve krom gibi iz elementlerin değişkenliği, renk geçişlerini ve şeritlerin netliğini belirlemektedir. Sonuç olarak, bantlı agatlarda yapısal farklılıklar; boşluk morfolojisi (küresel veya tabakalı), çökeltme

ortamının jeokimyasal koşulları ve iz element bileşimi ile doğrudan ilişkilidir. Bu farklılıkların incelenmesi, agatların mineralojik gelişimini ve oluştuğu hidrotermal sistemlerin evrimini anlamada önemli ipuçları sağlamaktadır.

### 3.1. Bantlı Agat Türleri

Agat türleri, oluşumları, renkleri ve özellikleri açısından oldukça çeşitlidir. Bu çeşitler, agatın oluşum süreci, mineral bileşimi ve oluştuğu coğrafi bölgeye bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.

#### 3.1.1. Botswana Agat

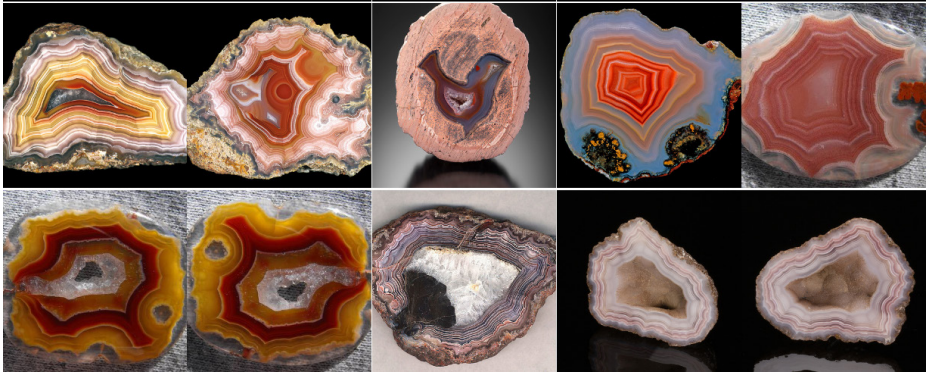
Botswana Agatı, Afrika'nın Botswana bölgesindeki, dünya üzerindeki en simetrik bantlara sahip agat çeşitlerinden biridir. Renkleri genelde gri, beyaz, bej ve kahverengi tonlarının varyasyonlarından oluşmaktadır (Şekil 6). Bu agatların bant yapısı, volkanik gaz boşluklarındaki silisli çözeltilerin tabanda düzenli bir şekilde çökmesiyle meydana gelmektedir. Bu çökeltilerde kil, silt ve kum gibi ince parçacıklarına rastlanabilmektedir. Botswana Agatı, genellikle yüksek silis içeren bazaltların içinde yer almaktadır ve mikroskobik kuvars kristalleriyle sıkı dokuludur (Geologyscience, 2024).



Şekil 6. Botswana agat örnekleri ( <https://www.mindat.org/gm/7592>)

#### 3.1.2. Laguna Dantelli Agat

Laguna Dantelli Agat, esas olarak Meksika'nın Chihuahua şehrinin engebeli arazilerinden, özellikle de Sierra del Teleno bölgesindeki Laguna kasabasının yakınlarından gelmektedir. Bu değerli taşın oluşum süreci, milyonlarca yıl öncesine, volkanik faaliyetlerin başladığı dönemlere kadar gitmektedir. Erimiş lav kayalardaki boşluklardan akarken, karmaşık ve renkli bantlar halinde başta kalsedon olmak üzere silika bakımından zengin mineral katmanları biriktirmiştir. Zamanla, silika açısından zengin çözeltiler kristalleşerek Laguna Dantelli Agat'ın büyüleyici bant desenlerini oluşturmuştur (Şekil 7). Bu bölgedeki özel jeolojik şartlar, demir ve diğer az miktarda bulunan minerallerin varlığıyla birlikte, taşın zarif renkleri ve desenleri üzerinde etkili olmaktadır (Geologyscience, 2024).



Şekil 7. Laguna dantelli agat örnekleri (<https://www.mindat.org/photoscroll.php?searchbox=Laguna+Agate+with+Chalcedony>)

### 3.1.3. Kondor Agat

Kondor Agat, Arjantin'in Patagonya bölgesinde, özellikle Mendoza'daki San Rafael yakınlarında 1990'ların başında keşfedilen, mikrokristalin kuvars ailesinden yarı değerli bir taştır. Kırmızı, turuncu, sarı ve toprak tonlarındaki canlı şeritleri, berrak veya süt beyazı katmanları arasında düz, kavisli ya da eşmerkezli desenler oluşturmaktadır (Şekil 8).. Mohs sertliği 6.5-7'dir ve yarı saydam yapısı sayesinde takı, süs eşyası ve koleksiyon için idealdir. Milyonlarca yıl önce Kretase dönemi volkanik patlamalarıyla oluşan bazalt ve tuf kayalarındaki gaz kabarcıkları zamanla boşalır, silika yüklü yeraltı suları bu boşluklara sızarak, katman katman çökelerek kristalleşir ve demir, manganez gibi iz elementler çarpıcı renk bantlarını yaratmaktadır (Geologyscience, 2024).



Şekil 8. Kondor agat örnekleri (<https://geologyscience.com/gemstone/condor-agate/>)

### 3.1.4. Superior Gölü Agatları

Superior Gölü Agatları, yaklaşık 1,1-1,2 milyar yıl önceki yoğun volkanik aktiviteler sırasında oluşan bazalt lav boşluklarında, silika açısından zengin yeraltı sularının milyonlarca yıl boyunca demir oksit, manganez ve diğer mineralleri katman katman biriktirmesiyle şekillenen, göz alıcı bantlı kalsedonlardır (Şekil 9). Kırmızı, turuncu, sarı, kahverengi ve bazen beyaz, yeşil veya mavi tonlarında eşmerkezli halkalar, surlar, gözler ve dendritik yapılarla zenginleşen bu agatlar, yarı saydamdan opak yapıya sahip olup Mohs sertliği 6,5-7 arasındadır (Brzys,

2010). Pleistosen Buzul Çağı'nda buzulların taşıyıp dağıttığı agatlar, bugün özellikle Minnesota'nın Kuzey Kıyısı (Duluth, Two Harbors, Grand Marais), Wisconsin'ın Apostle Adaları ve Bayfield Yarımadası, Michigan'ın Yukarı Yarımadası ile Kanada Ontario'sunun Thunder Bay-Marathon bölgelerindeki plajlar, çakıl ocakları ve nehir yataklarında bulunmaktadır. Doğal yollarla su ve rüzgâr tarafından cilalanan bu nadir taşlar, mücevher yapımında kabaşon ve boncuk olarak, lapidary sanatında, heykel ve dekoratif objelerde, koleksiyon parçaları olarak kullanılmaktadır (Geologyscience, 2024).



Şekil 9. Superior gölü agatları örnekleri (<https://www.mindat.org/min-9253.html>)

### 3.1.5. Çılgın Dantel Agat

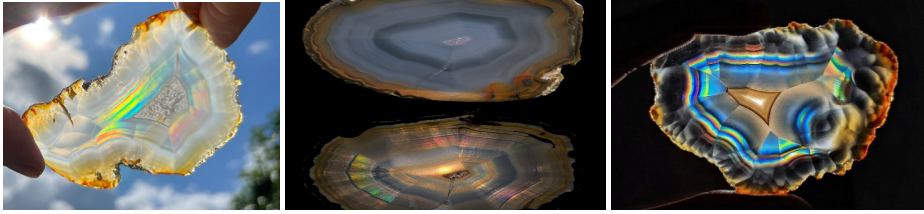
Çılgın Dantel Agat, Meksika'nın Chihuahua eyaletindeki volkanik bazalt boşluklarında, yaklaşık 20-30 milyon yıl önceki hidrotermal süreçlerde silika bakımından zengin sıvıların demir oksit, manganez ve diğer iz mineralleri katman katman biriktirmesiyle oluşan, kaotik dantel örgüsü veya renkli kıvrımlı bağcıkları andıran büyüleyici bant desenleriyle tanınan mikrokristalin kuvars (kalsedon) çeşididir (Şekil 10). Kırmızı, turuncu, sarı, kahverengi, gri, beyaz ve ara sıra yeşil-mavi tonlarında eşmerkezli halkalar, girdaplar ve rastgele motifler sergileyen bu yarı saydam-opak taş, Mohs sertliği 6,5-7 arasında, camsı ila mumsu parlaklıkta, konkoidal kırılma ve 2,58-2,64 g/cm<sup>3</sup> özgül ağırlıkta olup şatoyansı (kedi gözü etkisi) veya adularesans gibi optik oyunlar gösterebilmektedir (Brzys, 2010). Başta Chihuahua'nın Agua Nueva Ranch bölgesi olmak üzere Sonora, Botswana, Arizona, New Mexico, Brezilya, Avustralya ve Madagaskar'daki volkanik oluşumlarda madenlenen her örnek, yerel mineral bileşimine göre eşsiz desen ve renk varyasyonları taşımaktadır (Geologyscience, 2024).



Şekil 10. Çılgın dantel agat örnekleri(<https://www.mindat.org/gm/7595>)

### 3.1.6. İris Agat

İris Agat, volkanik lav boşluklarında milyonlarca yıl boyunca silika katmanlarının ince ince birikmesiyle oluşan, ışığın mikro yapılardan kırınımıyla gökkuşağı renk kuşağını andıran yanardöner renk oyunu sergileyen nadir bir kalsedon çeşididir (Şekil 11). Kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi, çivit ve menekşe tonlarında eşmerkezci bantlar, girdaplar, bulutlu desenler ve bazen kedi gözü etkisi taşıyan bu yarı saydam-opak taş, Mohs sertliği 6,5-7, camsimumsu parlaklık, kabuksu kırılma ve  $2,58-2,64 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlıkta olup demir, manganez oksit gibi safsızlıklarla renklendirilmektedir (Brzys, 2010). Başta Meksika Chihuahua, Brezilya (Rio Grande do Sul, Minas Gerais), ABD Oregon (Richardson's Çiftliği), Hindistan, Botsvana ve Uruguay'daki volkanik oluşumlarda bulunana İris Agat, antik uygarlıklarda koruyucu tılsım ve denge sembolü olarak kullanılmıştır. Günümüzde kolye ucu, küpe, yüzük gibi mücevherlerde merkez taş olarak, dilimlenmiş plaka veya yumurta kesim halinde dekoratif objelerde, koleksiyon örneklerinde, taş işçiliği sanatında, oyma-kakma projelerinde çokça tercih edilmektedir (<https://geologyscience.com/gemstone/iris-agate/>).



Şekil 11. İris agat örnekleri (<https://www.mindat.org/min-7610.html>)

### 3.1.7. Fairburn Agat

Fairburn Agat, Güney Dakota'nın Fairburn kasabası çevresindeki Oligosen dönemi White River Grubu tortul oluşumlarında, silika açısından zengin yeraltı sularının milyonlarca yıl boyunca demir-manganez oksit safsızlıklarıyla katman katman birikmesiyle şekillenen, kırmızı, turuncu, sarı, beyaz tonlarında eş merkezci halkalar, dalgalı ve köşeli bantları sergileyen, yarı saydam veya opak yapıya sahip nadir bir mikrokristalin kuvars çeşididir (Şekil 12) Mohs sertliği 6,5-7, camsı-mumsu parlaklık, kabuksu kırılma ve  $2,58-2,64 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlıkta olup canlı renk kontrastı ve karmaşık desenleriyle diğer agatlardan ayrılır (Brzys, 2010). Başta Black Hills bölgesi (Fairburn, Pringle), Nebraska ve Wyoming sınırlarına yakın alanlarda yüzeyde veya çakıl yataklarında bulunan Fairburn Agat, volkanik kül, silttaşı, kiltası ortamındaki gaz kabarcığı boşluklarında oluşmaktadır. Koleksiyoncularca doğal haliyle, kuyumcularda kabaşon kesim, boncuk veya kolye ucu olarak, taş işçiliğinde, heykel projelerinde ve dekoratif objelerin yapımında tercih edilmektedir (Geologyscience, 2024).



Şekil 12. Fairburn agat örnekleri (<https://www.mindat.org/gm/1441>)

### 3.1.8. Oniks

Oniks, mağara, volkanik çatlak, veya kireçtaşı-dolomit boşluklarında silika bakımından zengin suların milyonlarca yıl boyunca demir, krom, nikel gibi safsızlıklarla katman katman birikmesiyle oluşan, siyah tabanlı beyaz veya kahverengi, kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi bantlı mikrokristalin kuvars (kalsedon) çeşididir (Şekil13). Mohs sertliği 6,5-7'dir. Yarı saydam veya opak yapıda bulunabilmekte olup, mumsu parlaklık, kabuksu kırılmaya sahiptir. 2,6-2,7 g/cm<sup>3</sup> özgül ağırlıktadır ve siyah, yeşil, mavi, kırmızı, sarı, pembe, beyaz, gri ve sardoniks gibi varyasyonları bulunmaktadır (Brzys, 2010). Meksika, Pakistan, Brezilya, Hindistan, ABD, İran, Afganistan, Mısır, İtalya ve Türkiye'deki kireçtaşı-dolomit yataklarında madenlenen oniks, antik Mısır, Yunan, Roma ve İslam kültürlerinde koruyucu tılsım ve oyma minyatür olarak kullanılmıştır. Günümüzde vazo, kase, heykel gibi dekoratif objelerde; yüzük, kol düğmesi takılarında; tezgah, döşeme, duvar kaplama, sütun, şömine gibi mimaride tercih edilmektedir. Her parçası eşsiz bant deseniyle jeolojik bir sanat eseri olan oniks, nadirlik, dayanıklılık ve estetik değeriyle ekonomik öneme sahiptir. Boyanabilir veya işlenebilir olsa da doğal hali en kıymetlisidir (Geologyscience, 2024).



Şekil 13. Oniks örnekleri (<https://www.mindat.org/min-2999.html>)

### 3.1.9. Göz Agat

Göz Agat, volkanik-metamorfik kaya boşluklarında silika bakımından zengin hidrotermal sıvıların milyonlarca yıl boyunca safsızlıklarla katman katman birikmesiyle oluşan, eşmerkezci daireler veya bantlarla göz irislerini andıran desenler taşıyan nadir bir kalsedon çeşididir (Şekil14). Beyaz, gri, kahverengi-siyah, mavi, kırmızı tonlarında kontrastlı göz oluşumlarına ve yarı saydam-

opak yapıya sahiptir. Mohs sertliği 6,5-7'dir. Camsı-mumsu parlaklık, kabuksu kırılma ve 2,58-2,64 g/cm<sup>3</sup> özgül ağırlıkta olup mineral ve organik kapanımlar içerebilmektedir (Brzys, 2010). Başta Meksika (Chihuahua-Laguna), Brezilya (Rio Grande do Sul, Minas Gerais), ABD (Oregon-Owyhee, Kaliforniya, Arizona, Idaho), Hindistan (Maharashtra, Gujarat), Madagaskar (Antsirabe) ve Botsvana'daki yataklarda madenlenen göz agat, antik kültürlerde nazar koruyucu tılsım olarak kullanılmıştır. Günümüzde kabaşon, boncuk, kolye ucu formunda mücevherlerde; heykel, oyma, dekoratif objelerde; koleksiyon örneklerinde tercih edilmektedir (Geologyscience, 2024).



Şekil 14. Göz agat örnekleri (<https://www.mindat.org/gm/7598>)

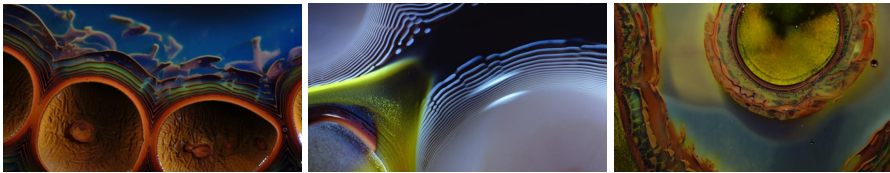
### 3.2. Bantlı Agatların Oluşumları

Bantlı agat türleri; oluşumları, renkleri ve özellikleri açısından oldukça çeşitlidir. Bu çeşitler, agatın oluşum süreci, mineral bileşimi ve oluştuğu coğrafi bölgeye bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Volkanik agatlar keskin bantları ve canlı renkleriyle, sedimante ragatlar ise organik desenleri ve pastel tonlarıyla öne çıkmaktadır. Günümüzde piyasadaki agatların büyük

çoğunluğu(%95) volkanik kökenlidir (Palyanova, 2021, s. 3-5; Götze et al., 2020).

Agatlar, temel olarak %98-99 oranında  $\text{SiO}_2$  içeren silika tabanlı taşlardır ve bu taşların oluşumu, ana kayaların değişimine bağlı olarak monomerik silisik asitin ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) polimerizasyonu ile başlamaktadır. Bu süreçte, silika koloidal sol-jel biçiminde desenler ve zarlar oluşturarak, pH ve sıcaklık gibi katalizörler ile eser elementlerin (Fe-oksitler, Mn) etkileşimleri yoluyla kalsedonlaşmaya (mikrokristalin kuvars dönüşümüne) neden olmaktadır. Genel süreç, sızma (difüzyon), birikim (çökeltme), katılma (jelin sertleşmesi) ve sıkıştırma (su dışarı atılması) aşamalarını içermektedir. Kolloidler gözenekli yapıyı desteklerken, sıvı değişimi mineralizasyon sürecini harekete geçirmektedir (Brzys, 2010; Savva, 2021; Götze et al. , 2020).

Yapılan literatür ve örnek incelemeleri sonucunda, bantlı agatlardaki yapısal farklılıkların başlıca nedeninin silis çökeltme koşullarındaki jeokimyasal değişkenlikler olduğu belirlenmiştir. Bantlanma; sıcaklık, pH, oksidasyon potansiyeli ve iyon derişimindeki periyodik dalgalanmalara bağlı olarak oluşmaktadır. Farklı boşluk morfolojileri (küresel, çatlak, tabakalı) bant geometrisini belirlerken; iz elementler (Fe, Mn, Cr vb.) renk çeşitliliğini oluşturmaktadır. Ayrıca, Liesegang halkaları (Şekil 15) ve Belousov–Zhabotinsky reaksiyonu gibi kimyasal osilasyon süreçlerinin, agatlarda görülen ritmik katmanlanmayı açıklayabildiği tespit edilmiştir.

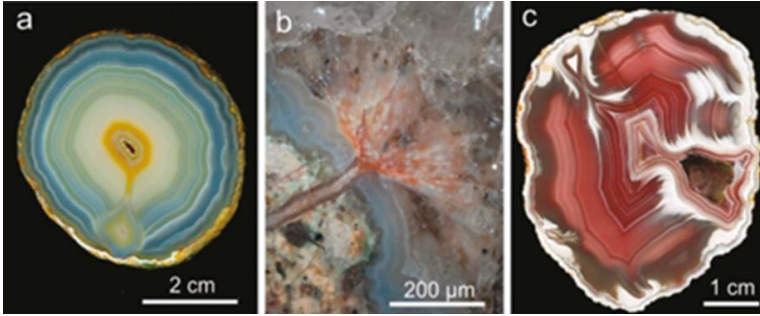


**Şekil 15. Kimyasal aktivitelerin oluşturduğu dairesel dalgalılar-liesegang halkaları (GabrielKelemen. Liesegang Rings — Plasmogenia, 2016).**

Bantlı agatlar, volkanik bazalt ve andezit gibi ana kayalardan düşük sıcaklıkta (<100 °C) salınan silisik asitin ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) gaz keseciklerine (veziküller) ve çatlaklara difüzyonuyla amorf silika jeli halinde birikmesiyle oluşmaya başlamaktadır. Bu birikim, milyonlarca yıl boyunca Belousov–Zhabotinsky (BZ) reaksiyonu benzeri ritmik osilasyonlarla kendini organize etme süreçleri → olgunlaşması → moganit → kuvars kristalizasyonu ve su kaybı (%2’den %0.1’e düşüş) ile evrilerek tamamlanmaktadır. Bant desenleri ise kristalit boyutu (50-100 nm), gözeneklilik oranları ve eser elementlerin (Fe, Al, Mg) periyodik ayrışmasının neden olduğu ritmik dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Liesegang halkaları teorisi artık geçersiz olup, bantlanma dış zorlama olmadan iç dinamiklerle (BZ tipi oto-kataliz) gerçekleşmektedir. Böylece milyonlarca yıl boyunca hâlâ olgunlaşmaya devam eden canlı jeolojik

desenler meydana getirmektedir (Götze et al., 2020; Moxon and Palyanova, 2020).

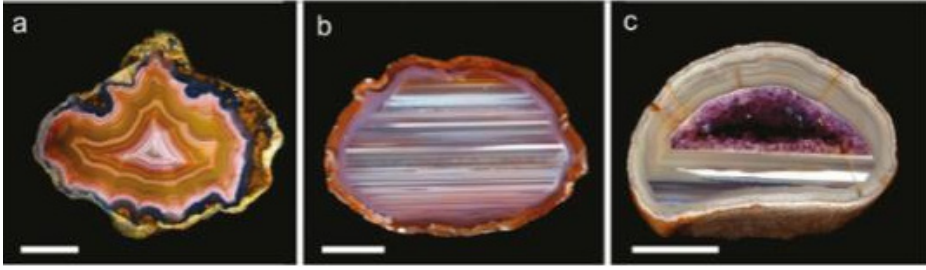
Agatların yapısal çeşitlilikleri, oluşum şartları, silika kaynakları ve hem inorganik hem de organik süreçlerle ilgilidir (Götze et al., 2020). Mafik volkanik agatlardaki “sızma kanalları” (Şekil 16), silika tedarik yollarını göstermektedir. Spiralli yeni agat türünde biyojenik kökenli (foraminifera-salyangoz mikrofosilleri) olabileceği düşünülmekteydi; fakat yapılan incelemeler, inorganik büyüme polimerizasyonla amorf silika öncüsünden oluştuğunu ortaya koymuştur. Şekil 16’da örnekler yer almaktadır.



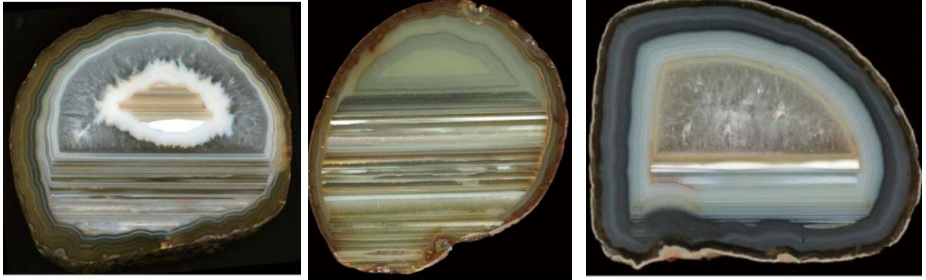
Şekil 16. Agatlardaki yapısal özellikler: ( a ) “sızma kanalı” (“kaçış tüpü”) gösteren Moctezuma, Chihuahua’dan (Meksika) gelen agat. ( b ) en dıştaki kalsedon tabakasını kesen, agatın içine silika giriş kanalına benzeyen, Saksonya’nın (Almanya) Zschaitz kentinden gelen bir agatın marjinal kısmının mikrografı ( c ) çoklu deformasyon özelliklerine sahip Queensland (Avustralya) AgateCreek’ten gelen agat (Götze, et al., 2019).

Hem yerçekimi hem de boşluk yapısına yapışma bantlarının oluşumunun büyük ölçüde iklim tarafından kontrol edildiği öne sürülmektedir. Yerçekimi bantlarının oluşumunu teşvik eden başlıca faktörler şunlardır: (1) önemli lav kalınlığı ve uzun süreli termal akış, (2) bol miktarda nispeten kolay ayrıışan mineral bileşenler, (3) atmosferde ve volkaniklerin içinde dolaşan sıvılarda artan karbondioksit, (4) sıcak iklim ve (5) yeterli yağış olarak belirtilmektedir. Petránek, Jan. (2004).

Agatlar da en az iki çeşit bantlama mevcuttur: (I) boşluğun dış formuna uyumlu duvar kaplama (tahkimat agat ( Şekil 11a ) ve (II) paralel yatay yönelime sahip silika katmanlı akikler (“Uruguay akiki”, su hattı akiki) ( Şekil 11b ). İkiana akik bantlanmasının bir arada olduğu farklı kombinasyonlar da olabilmektedir. ( Şekil 11c ) (Şekil 17-18)



Şekil 17. Agatlar da bantlama tiplerine örnekler; (a) DuvarKaplamaşı; (b) Yatay Bantlama (C) Karışık agat türü : duvar kaplaması + Yatay Bantlama + Merkezde Makrokristalin Ametist (Götze, at al 2020).



Şekil 18. Yer çekimi atmosferik etkiler nedeni ile oluşan karışık yapılı Urugay akikler ( Petráněk, Jan. (2004).

### 3.3. Bantlı Agatların Oluşum Teorileri

Agatların oluşum süreci muhtemelen volkanik faaliyetler sırasında başlamıştır. Magmatik sıvıların katılımı ile ikincil mineralleri oluşturan silika ve diğer kimyasal elementlerin ortaya çıkışı meteorik sıvıların ısındığının göstergesidir. Volkanik kayalar dışında, agatlar farklı süreçlerle ve farklı kayalar türlerinde de oluşabilir. Farklı ana kayalarda, çoğunlukla hidrotermal çözeltilerle breş, çatlak ve yarıklarda girmesi ile damar agatlar şeklinde görülür. Bu nedenle damar agatları genellikle hidrotermal cevher yataklarıyla ilişkilendirilir ki sadece volkanik ana kayalarla değil aynı zamanda magmatik ve metamorfik ana kayalarda da bulunabilir /Götze, at al 2020).

Tortul kayalarda agat oluşumu, volkanik ana kayalardakine oranla daha az görülür. Tortul agatlar, çoğunlukla karbonat kayaların ve klastik tortuların içerisinde düzensiz formlar olarak bulunmuştur. Ayrıca, hayvan (ABD'nin Utah eyaletinden silisleşmiş dinozor kemikleri) bitki (silisleşmiş odun kalıntılarından) parçalarının silisleşmesi, de çoğunlukla yüzeye yakın bölgelerde dir. Ayrıca birincil yataklardan ikincil çökmesi ve yeniden dağıtılma agatlarda çokça görülür (Götze, at al 2020).

Agat oluşumlarını tüm kayalar tiplerinde açıklanmasına yönelik aşağıda verilen silika oluşum teorileri ile açıklanmaktadır

**Ritmik (Periyodik) Çökeltme Teorisi:** Bu düşünce en yaygın olanıdır. Agatların meydana geldiği boşluklara zaman içerisinde silis açısından zengin çözeltiler girmektedir; bu çözeltiler sıcaklık, pH, oksijen ve iyon değişimi gibi faktörlerdeki düzenli değişikliklere tepki vermektedir. Her değişim döngüsü, farklı renk, saydamlık veya doku özelliklerine sahip yeni bir tabakanın ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Böylece, milyonlarca yıl süren döngüler neticesinde bantlı bir yapı oluşmaktadır (Götze, 2011). Bu modele göre, bantların “mevsimsel” ya da “kimyasal değişimler” dolayısıyla ritmik olarak meydana geldiği gösterilmiştir (Flörke, Graetsch, Miehe, 1982).

**Diffüzyon ve Jel Modeli (Silika Jeli Teorisi):** Bu teoriye göre agat, başlangıçta boşluklarda yarı katı bir silis jeli formunda birikmektedir. Silis jelindeki iyonlar ( $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$  gibi) farklı hızlarda yayılmaktadır (Götze, 2011). Jel içindeki yerel kimyasal farklılıklar zamanla bantlar oluşturmaktadır. Katılaşma sürecinde bu bantlar yerleşmiş ve kristalleşmiştir. Bu modele göre, şeritlerin oluşumu, dışsal faktörlerden ziyade iç difüzyon süreçleriyle açıklanmaktadır.

**Mikrobiyolojik (Biyojenik) Teorisi:** Bazı günümüz araştırmaları, agatların oluşumunda mikroorganizmaların rol oynayabileceğini ileri sürmektedir. Silis çökeltmesinin, mikroorganizmalar tarafından yaratılan biyofilm yüzeylerinde meydana geldiği düşünülmektedir. Bu biyofilm yapıları, katmanlar arasında bir bariyer işlevi görerek bantların oluşumuna yardımcı olur. Özellikle düşük sıcaklıktaki hidrotermal ortamlarda bu süreç daha muhtemeldir (Götze, Möckel, 2011).

**Boşluk Morfolojisi:** Bantlanmanın şekli, bazen boşluğun yapısıyla doğrudan bağlantılıdır. Küresel boşluklarda dairesel (konsantrik) bantlar meydana gelirken çatlak ya da tabakalı boşluklarda yatay (şeritli) bantlar oluşur. Silis çözeltileri, yerçekimi etkisiyle boşluğun duvarlarına paralel sıvama şeklinde çökler. (Brzys, 2010).

**Deformasyon ve Gerilme Teorisi:** Bazı agatlarda bantların eğilmesi veya kırılması, taşın oluşum sırasında mekanik gerilme altında kristalleştiğini gösterir. Bu modele göre, bantlanma süreci bittikten sonra meydana gelen tektonik hareketler veya hacim daralmaları, mevcut bantları deforme eder. Bu nedenle bazı agatlarda kıvrılmış veya dalgalı bantlar gözlenir (Moxon, 2010).

#### 4. SONUÇLAR

Silikanın jel-kolloid dönüşümleriyle meydana gelen bant yapıları; sıcaklık, pH ve iz element değişiklikleriyle birlikte renk ve doku çeşitliliği elde etmektedir. Araştırma, dışsal (ritmik çökeltme, boşluk morfolojisi) ve içsel (difüzyon, biyojenik etkiler) süreçlerin eş zamanlı olarak etkili olduğunu ve yer kabuğu olaylarının dinamik doğasını anlamada değerli bilgileri ortaya

koymaktadır. Bantlı agatlar, hidrotermal sistemlerin kimyasal ve fiziksel evrimi açıklayan doğal kayıtlardır.

Bantlı agatların oluşumu, tek bir mekanizmayla açıklanamayacak kadar karmaşık olduğu bir kayaçta birden fazla bantlanma türünü görülmesi, birden fazla jeokimyasal ve fiziksel sürecin ortak etkisiyle gerçekleştiği, bant gelişiminin çevresel değişkenlere duyarlı dinamik bir süreç olduğunu kanıtlar niteliktedir.

## KAYNAKLAR

- Başıbüyük, Z., Kaydu Akbudak, I. and Gürbüz, M. (2020). Mineralogical, geochemical and gemological investigation of Artova Ch-chalcedonies, Tokat – Turkey. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 36(1), 77–92. <https://doi.org/10.24425/gsm.2020.132551>
- Başıbüyük, Z., Gürbüz, M., and Kaydu Akbudak, İ. (2023). Surpriseeggs, themiracle of nature: almusagates (Tokat-Türkiye). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*, 5-22.
- Brzys, K. A. (2010). *Agates: Inside out*. Grand Marais, MI: GeoSciencePress. ISBN 978-1-891143-97-7.
- Flörke, O. W., Graetsch, H., and Miehe, G. (1985). Thenature of water in chalcedonyand opal-C from Brazilian agate geodes. *Physics and Chemistry of Minerals*, 12(5), 300–306.
- Götze, J. (2009). Cathodoluminescence microscopy and spectroscopy of lunar rocks and minerals. In A. Gucsik (Ed.), *Cathodoluminescence and its application in the planetary sciences* (pp. 87–110). Springer.
- Götze, J. (2011). Agate – Fascination between legend and science. In J. Zenz (Ed.), *Agates III* (pp. 19–133). Bode-Verlag.
- Götze, J., Möckel, R., and Pan, Y. (2020). Mineralogy, geochemistry and genesis of agate — A review. *Minerals*, 10(11), 1037. <https://doi.org/10.3390/min10111037>
- Hatipoğlu, M. (2009). “Aydın bölgesinin süstaşı kalitesindeki dumanlı ve renksiz kuvars kristalleri.” 62th GeologicalCongress of Turkey, pp. 98-99.
- Hatipoğlu, M. (2017). “Agat (akik) taşı üzerine efsaneler ve inanışlar.” V. Uluslararası Halk Kültürü ve Sanat Etkinlikleri Sempozyumu, pp. 212-216.
- Heaney, P. J., and Davis, A. M. (1995). Observation and origin of self-organized textures in agates. *Science*, 269(5230), 1562–1565.
- Jr. P., F. (1982). *Indian Agate Beads*, (LapisRouteBooks). The World of Beads Monograph Series 6. India.
- Kaydu Akbudak, İ., Başbüyük Z. ve Gürbüz, M. (2018). “Yozgat “Aydıncık” kalsedon-ametist oluşumlarının mineralojisi-petrografisi ve ekonomikliliğinin incelenmesi.” DÜMF, Mühendislik Dergisi 9:1 s. 313-324.
- Kelemen G. 2017 “Concentric Archetype and Liesegang Rings” A XVII-a Conferință internațională – multidisciplinară, „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești” – Sebeș 2017At: Romania SebesVolume: ȘTIINȚĂ ȘI INGINERIE Editura AGIR, București – ISSN 2067-7138 și eISSN 2359 – 828
- [https://www.researchgate.net/publication/316940479\\_Concentric\\_Archetype\\_and\\_Liesegang\\_Rings](https://www.researchgate.net/publication/316940479_Concentric_Archetype_and_Liesegang_Rings)
- Moxon, T., and Rios, S. (2004). Moganiteandwatercontent as a function of age in agatesfromdifferentlocalities. *Mineralogical Magazine*, 68(5), 729–740.
- Moxon, T., and Palyanova, G. (2020). Agategenesis: A continuingenigma. *Minerals*, 10(11), 953. <https://doi.org/10.3390/min10110953>
- Özbay Candan, E., Kaydu Akbudak, İ., Başbüyük, Z., Ekincioglu, G. (2022). Tokat Nebiköy Kalsedonlarının Mineralojik-Petrografik ve Gemolojik İncelemesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 65(3), 287-296. <https://doi.org/10.25288/tjb.1121899>
- Pabian, R. K., and Zarins, K. (1994). *Agates: Treasures of the Earth*. GeosciencePress.
- Palyanova, G. (2021). Editorialforspecialissue “Agates: Types, mineralogy, deposits, hostrocks, agesandgenesis”. *Minerals*, 11(10), 1035. <https://doi.org/10.3390/min11101035>
- Papineau, D. (2024). Chemicallyoscillatingreactions as a new model fortheformation of mineral patterns in agategeodesandconcretions. *Minerals*, 14(2), 203. <https://doi.org/10.3390/min14020203>
- Petránek, J. (2004). Gravitationallybanded (“Uruguay-type”) agates in basalticrocks — Whereandwhen? *Bulletin of Geosciences*, 79, 305–316.
- Ritter, J. (2024). Agatebay [YouTube kanalı]. YouTube. <https://www.youtube.com/@joshuaritter-agatebay>
- Şahin, S. Y. (2011). Silikatlar 17 Mayıs 2024 tarihinde <https://iujfk.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/06/c3b6zel-min-silikatlar.pdf> adresinden erişildi.

- Savva, N. E. (2021). New concept of silicasource in agates (Fluoride model). *EnvironmentalScience& Natural Resources*, 28(1), 556226. <https://juniperpublishers.com/ijesnr/pdf/IJESNR.MS.ID.556226.pdf>
- Schumann, W. (2005). *Gemstones of the Worlds*, Sterling, New York, USA.
- Wang, Y.,andMerino, E. (1990). Self-organizationalorigin of agates: Banding, fiber twisting, andtheLiesegangmechanism. *AmericanJournal of Science*, 290(6), 687–708.
- Yüzbaşıoğlu, T.Y. and KayduAkbudak, İ. (2024) Mineralogical Characteristics and TheirUsability as Gemstones of Jaspers in Altered Metavolcanics Belongingtothe Topçam Formation, Tokat, Türkiye. *Minerals*, 14, 1072.
- Geologyin (ty) *Agate type* 10 Kasım 2025 tarihinde <https://www.geologyin.com/2016/08/types-of-agate-with-photos.html> adresinden erişildi.
- Geologyin (ty) *Major-varieties-of-quartz*.html 10 Kasım 2025 tarihinde <https://www.geologyin.com/2016/04/major-varieties-of-quartz.html> adresinden erişildi.
- Geologyin (ty) *Agat Türleri* 8 Kasım 2025 tarihinde (<https://www.geologyin.com/2016/08/types-of-agate-with-photos.html>) adresinden erişildi.
- Geologyin (ty) *Kondor Agat Örnekleri* 14 Kasım 2025<https://geologyscience.com/gemstone/condor-agate/> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Agate*. 8 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-51.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Botswana Agate*. 8 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-7592.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Carnelian*. 8 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-9333.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Chalcedony*. 8 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-960.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Chert*. 9 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-994.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Chrysoprase*. 9 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-952.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Crazy Lace Agate*. 9 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-7595.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Fairburn Agate*. 9 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-1441.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Jasper*. 9 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-2082.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Laguna Dantelli Agat Örnekleri* 12 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/photoscroll.php?searchbox=Laguna+Agate+with+Chalcedony>
- Mindat.org. (t.y.). *Moctezuma Agate*. 9 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/locentry-504431.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Superior Gölü Agatları Örnekleri* 14 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-9253.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *İris Agat Örnekleri* 25 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-7610.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Fairburn Agat Örnekleri* 25 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/gm/1441> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Oniks Örnekleri* 25 Kasım 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-2999.html> adresinden erişildi.
- Mindat.org. (t.y.). *Göz Agat Örnekleri* 25 Kasım 2025 tarihinde . <https://www.mindat.org/gm/75981> adresinden erişildi

# BAZI MAVİ RENKLİ SÜSTAŞLARININ FİZİKSEL, KİMYASAL VE GEMOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE DERLEME

İlkay Kaydu Akbudak<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

Süstaşları, estetik görünümü, renk çeşitliliği, parlaklık özellikleri, dayanıklılığı ve nadirliği nedeniyle takı, süs eşyası ve dekoratif amaçlarla kullanılan doğal veya işlenmiş mineraller, kayalar ya da taşlaşmış organik materyaller için kullanılan bir terimdir (Çoban, 2020; Güney ve Hatipoğlu, 2022; Kaydu Akbudak. vd., 2023).

Mavi renkli süstaşları, mineralojik çeşitlilikleri, optik özellikleri ve kültürel-tarihsel kullanımlarıyla dünyanın birçok bölgesinde dikkat çeken önemli gemolojik materyallerdir (Kaydu Akbudak, vd., 2018; Özbay Candan, vd., 2022). Mavi elmas, safir, akuamarin, (Şekil 1) mavi topaz, lapolazuli, (Şekil 2) sodalit, larimar, azurit, kyanit, turkuvaz ve mavi kalsedon gibi mineraller; hem kristal kimyası hem de iz element içerikleri açısından gösterdikleri farklılıklar nedeniyle mavi rengin oluşum mekanizmasını açıklamada önemli bir araştırma konusu oluşturmaktadır (Fritsch and Rossman, 1988). Bu minerallerin optik davranışları, pleokroizma düzeyleri, absorpsiyon bantları, kristal sistemleri, inklüzyon türleri ve UV floresans özellikleri, gemolojik tanımlama süreçlerinin temelini oluşturmaktadır. Literatürde, mavi renklenmenin çoğunlukla  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Ti^{4+}$  veya  $Cu^{2+}$  gibi geçiş metalleri ile açıklanabildiği; inklüzyonlar ve kristal alan geçişlerinin de renkliliğe katkı sunduğu belirtilmektedir (Fritsch, and Rossman, 1988; Groat, et al., 2010).



Şekil 1. 0,15 karat ağırlığında doğal mavi elmas örneği (solda) (<https://www.gemdat.org/photo-4295.html>), Ratnapura Bölgesi, Sabaragamuwa Eyaleti, Sri Lanka'dan safir örneği (ortada) (<https://www.mindat.org/min-1136.html>), Roundu Bölgesi, Pakistan'dan akuamarin örneği (sağda) (<https://www.mindat.org/min-289.html>)

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, ORCID ID: 0000-0003-0884-5991; e-mail: i.akbudak@ahievran.edu.tr

Oldukça nadir bulunan mavi elmaslar, Tip IIb elmaslar olarak sınıflandırılırlar ve bu mavi renge kristal yapısına giren iz miktardaki bor elementi neden olmaktadır (Regier, et al., 2023). Alüminyum oksit minerali olan safirin (Palke, et al., 2023; Skawold and Bassett, 2016) mavi tonları,  $Fe^{2+}$ - $Fe^{3+}$  yük transferinin etkisiyle  $Fe^{2+}$ -O-  $Ti^{4+}$  yük transferi sonucu ortaya çıkmaktadır. Beril grubuna ait olan akuamarinin rengi ise komşu  $Fe^{3+}$ - $Fe^{2+}$  çiftleri arasındaki yük transferinden kaynaklanmaktadır (Groat, et al., 2010; Lin, et al., 2013; Lum, 2017). Larimar (mavi pektolit), Azurit ve Turkuvazda renklenmeye oktahedral koordinasyonlarındaki  $Cu^{2+}$  varlığı neden olurken; Kyanitteki mavi renklenmeye ise  $Fe^{2+}$ -O- $Ti^{4+}$  yük transferi ile  $Fe^{2+}$ -O- $Fe^{3+}$  yük transferi neden olmaktadır. Kuvars grubuna ait mavi kalsedon (Moxon, and Palyanova., 2020; Götze, et al., 2020) mineralinde mavi dumortierit, turmalin ve ilmenit safsızlıklarının renklenme üzerinde etkisi bulunmaktadır (Fritsch and Rossman, 1988).



Şekil 2.Karoi Bölgesi, Mashonaland West, Zimbabve'den mavi topaz örneği (solda) (<https://www.mindat.org/min-3996.html>) ve Kuran waMunjan Bölgesi, Badakhshan, Afganistan'dan lapislazuli örneği (sağda) (<https://www.mindat.org/min-2330.html>).

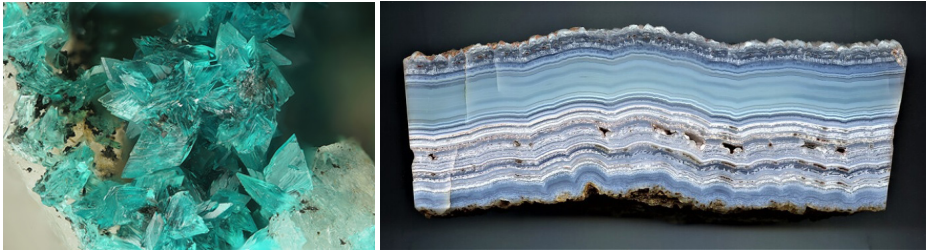
Gemolojik açıdan bakıldığında, bu minerallerin parlaklık, UV-flüoresans ve dilinim özellikleri de ayırt edicidir. Örneğin safir ve akuamarin cam parlaklığı gösterirken, turkuvaz (Şekil 5) ve lapis lazuli çoğunlukla mumsu veya yağsı parlaklık karakterine sahiptir. Sodalit güçlü turuncu-kırmızı flüoresansı ile tanınırken, topaz kısa dalga UV altında belirgin altın sarısı tepkime verir (Nikbakht et al., 2016). Topaz, mavi pektolit (larimar) (Şekil 3) ve kyanitte (Şekil 4) bulunan mükemmel dilinimler, ayırt edici bir özellik olmakla birlikte bu taşların kesim ve işlenebilirliğini belirleyen en önemli faktördür diyebiliriz.



Şekil 3. Kuran waMunjan Bölgesi, Badakhshan, Afganistan'dan sodalit örneği (solda) (<https://www.mindat.org/min-3701.html>) ve Filipinas Larimar Madenleri, Barahona Eyaleti, Dominik Cumhuriyeti'nden larimar (mavi pektolit) örneği (sağda) (<https://www.mindat.org/min-29025.html>).



Şekil 4. Santa Lucía Madeni, Endülüs, İspanya'dan azurit örneği (solda) (<https://www.mindat.org/min-447.html>), ve Leventina, Ticino, İsviçre'den kyanit örneği (sağda) (<https://www.mindat.org/min-2303.html>)



Şekil 5. Campbell Kasabası, Virginia, ABD'den turkuvaz örneği (solda) (<https://www.mindat.org/min-4060.html>) ve Ysterputz Madeni, Karas Bölgesi, Namibya'dan kalsedon örneği (sağda) (<https://www.mindat.org/min-960.html>)

Bu minerallerin gemolojik özellikleri kristal sistemleri, kırılma indisleri, pleokroizma davranışları ve spektral absorpsiyon bantları bakımından da geniş bir çeşitlilik göstermektedir. Safir, akuamarin, azurit ve kyanit gibi minerallerde belirgin pleokroizma gözlenirken; sodalit, lapislazuli, turkuvaz

ve kalsedon gibi minerallerde pleokroizma gözlenmemektedir. Kırılma indisi değerleri 1.48–1.83 aralığında değişmekte olup bu optik parametre taşların ayırt edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca karbon kapanımları (mavi elmas), rutil iğnecikleri (safir), pirit kapanımları (sodalit), Fe–Ti safsızlıkları (kyanit) ve Cu içerikleri (larimar, turkuvaz, azurit) gibi inklüzyon türleri renklenmenin yanı sıra çeşitli efektlere de neden olarak taşlara estetik açıdan karakteristik özellikler katabilmektedir (örneğin rutil iğnecikleri safirde dört ya da altı bacaklı yıldız efektinin oluşmasını sağlamaktadır (Skalwold and Bassett, 2016)) (Şekil 6).



Şekil 6. Sri Lanka’dan yıldız safir örnekleri üzerinde rutil iğneciklerinin neden olduğu yıldız efekti (<https://www.mindat.org/min-30580.html>)

Bu bilgiler ışığında, mavi renkli süstaşlarının gemolojik özelliklerinin sistematik olarak incelenmesi mineral tanımlama süreçlerine katkı sunmaktadır. Bu çalışma, söz konusu minerallerin fiziksel, kimyasal ve optik özelliklerini karşılaştırmalı olarak ele alarak mavi renklenmenin mineralojik ve jeokimyasal temellerini açıklamayı amaçlamaktadır.

## 2. MATERYAL VE METOT

Bu derleme çalışmasında mavi renkli süstaşlarının mineralojik, kimyasal, optik ve gemolojik özelliklerine ilişkin mevcut bilimsel birikimi ortaya koymak amacıyla kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Öncelikle Web of Science, Scopus ve Google Scholar veri tabanlarında “bluegemstones”, “colormechanisms”, “chalcedony”, “sapphire”, “azurite”, “blueminerals” ve “spectroscopic characterization” gibi anahtar kelimeleri kullanılarak 1980–2024 yılları arasında yayımlanmış makaleler, tezler ve kitaplar taranmıştır. Renklenme mekanizmaları, kristal kimyası, optik davranışlar, UV tepkileri ve gemolojik ayırt edici özelliklere odaklanan çalışmalar öncelikli olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada yalnızca bilimsel geçerliliği yüksek, mineralojik

ve spektroskopik veriler sunan yayınlar dikkate alınmıştır. Bu kapsamda elde edilen bulgular doğrultusunda mavi renkli süstaşlarının sınıflandırılması, renklenme süreçleri ve gemolojik ayırt edicilikleri literatür taraması temelli olarak değerlendirilmiştir.

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Tablo 1’de, doğal olarak oluşmuş, değerli ve yarı değerli bazı mavi süstaşlarının kimyasal formülleri, fiziksel özellikleri ve renklenme mekanizmaları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Tabloya göre mavi süstaşlarında Mohs sertliği oldukça geniş bir aralıkta değişmektedir. Mavi elmas (10) ve Safir (9) yüksek sertliğe sahipken (Bootkul, et al., 2015); sodalit ve lapislazuli daha düşük değerlere (5-6) sahiptir. Kriptokristalin kuvars (Götze, et al., 2020) türü olan kalsedon 6.5–7 aralığında bulunur (Başbüyük, et al., 2020; Papineau., 2024) ve karbonat minerali olan Azurit ise nispeten daha düşük sertliğe sahiptir.

Yoğunluk değerleri mineral bileşimine göre değişmekle birlikte 2.2–4.0 g/cm<sup>3</sup> aralığındadır. Kuvars grubu (Götze, et al., 2015; Alekseyev, et al., 2025) yaklaşık 2.6 g/cm<sup>3</sup> (Flörke, et al., 1982), safir ise 4.0 g/cm<sup>3</sup>’e yakın değerler sergilemektedir (Kaydu Akbudak et al., 2021).

Mavi renkli süstaşları, kimyasal bileşimleri, kristal yapıları ve eser element içerikleri bakımından geniş bir çeşitlilik göstermekte olup renk oluşum mekanizmaları çoğunlukla geçiş metalleriyle ilişkili yük transferi süreçlerine dayanmaktadır. Yüksek sertlik ve dayanımıyla bilinen Mavi elmas (C) rengini iz miktarda içerdiği bor elementinden alırken (Regier, et al., 2023); safir (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ise mavi rengini Fe<sup>2+</sup>–Fe<sup>3+</sup> ve Fe<sup>2+</sup>–Ti<sup>4+</sup> arasındaki yük transferinden almaktadır. Benzer şekilde beril grubunun mavi çeşidi olan akuamarinin (Be<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>18</sub>) rengi, komşu Fe<sup>3+</sup>–Fe<sup>2+</sup> çiftleri arasındaki yük transferinden kaynaklanmaktadır. Mavi topazda ise TiO<sub>6</sub> bileşikleri ve Cr<sup>3+</sup> iyonlarının varlığı rengin belirleyici unsurudur. Lapislazulide S<sub>3</sub><sup>-</sup> radikal iyonunun yük transferi ve sodalitte Al-S yakınındaki interstisyel O<sup>-</sup> iyonları mavi rengin nedeni olarak rol oynamaktadır. Pektolitin Cu<sup>2+</sup> içeren nadir bir varyantı olan larimar, mavi rengini oktahedral koordinasyondaki bakırdan alırken; bakır karbonat minerali azuritte de benzer şekilde Cu<sup>2+</sup> iyonlarının uzamış oktahedral yapıdaki varlığı belirleyici rol oynar. Kristal yapısı yönlü fiziksel özellikler gösteren kyanitin mavi çeşitlerinde ise Fe<sup>2+</sup>–Ti<sup>4+</sup> ve Fe<sup>2+</sup>–Fe<sup>3+</sup> arası yük transferi ve Fe iyonlarının oktahedral koordinasyondaki geçişleri etkili olmaktadır. Fosfat mineral grubu üyesi turkuvazın karakteristik mavisi de yine Cu<sup>2+</sup> iyonlarına bağlıdır. Kriptokristalin kuvars grubu üyesi olan mavi kalsedonda ise renk çoğunlukla dumortierit, turmalin veya ilmenit gibi mikroskobik safsızlıkların varlığıyla ilişkilidir (Fritsch and Rossman, 1988).

Bu genel değerlendirme, mavi süstaşlarının renk oluşumunun büyük ölçüde geçiş metalleri, kristal içi defektler ve yapısal geçişlerin kontrolünde gerçekleştiğini açıkça ortaya koymaktadır.

**Tablo 1. Mavi Süstaşlarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Kimyasal Formül, Sertlik, Yoğunluk, Renklenme Nedeni)**

| Mineral                 | Kimyasal Formül                                                                                                          | Sertlik (Mohs)       | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Renklenme Nedeni                                                                                                                                                                       |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mavi elmas              | C                                                                                                                        | 10                   | 3.47–3.55                     | Bor (B) elementinin kristal yapıya ppm düzeyinde girmesi                                                                                                                               |
| Safir                   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                                           | 9                    | 3.98–4.06                     | Fe <sup>2+</sup> -Fe <sup>3+</sup> yük transferinin etkisiyle Fe <sup>2+</sup> -O- Ti <sup>4+</sup> yük transferi                                                                      |
| Akuamarin               | Be <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub>                                                          | 7.5–8                | 2.65–2.85                     | Komşu Fe <sup>3+</sup> -Fe <sup>2+</sup> çiftleri arasındaki yük transferi                                                                                                             |
| Mavi Topaz              | Al <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (F,OH) <sub>2</sub>                                                                     | 8                    | 3.49 – 3.57                   | TiO <sub>6</sub> ve Cr <sup>3+</sup> iyonları                                                                                                                                          |
| Lapis Lazuli            | Na <sub>7</sub> Ca(Al <sub>6</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>24</sub> )(SO <sub>4</sub> )(S <sub>3</sub> )·H <sub>2</sub> O | 5-5,5                | 2.38–2.45                     | S <sub>3</sub> <sup>-</sup> yük transferi                                                                                                                                              |
| Sodalit                 | Na <sub>8</sub> (Al <sub>6</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>24</sub> )Cl <sub>2</sub>                                        | 5.5–6                | 2.27–2.33                     | Al veya S yakınında interstisyel 0 <sup>+</sup> iyonu                                                                                                                                  |
| Larimar (Mavi Pektolit) | NaCa <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (OH)                                                                    | 4,5–5                | 2.84 - 2.90                   | Oktahedral koordinasyonda Cu <sup>2+</sup> varlığı                                                                                                                                     |
| Azurit                  | (Cu <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> )                                                     | 3.5–4                | 3.77–3.89                     | Uzamış oktahedral koordinasyonda Cu <sup>2+</sup> varlığı                                                                                                                              |
| Kyanit (Mavi çeşit)     | (Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> )                                                                                      | 4.5–7 (yönlere göre) | 3.53–3.67                     | Fe <sup>2+</sup> -O-Ti <sup>4+</sup> yük transferi, Fe <sup>2+</sup> -O-Fe <sup>3+</sup> yük transferi,Oktahedral koordinasyonda Fe <sup>2+</sup> ve Fe <sup>3+</sup> rol oynayabilir. |
| Turkuvaz                | CuAl <sub>6</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> (OH) <sub>8</sub> ·4H <sub>2</sub> O                                   | 5 – 6                | 2.60 – 2.90                   | Oktahedralkoordinasyonda Cu <sup>2+</sup> varlığı                                                                                                                                      |
| Mavi Kalsedon           | SiO <sub>2</sub>                                                                                                         | 6.5–7                | 2.59-2.61                     | Mavi dumortierit, Turmalin ve ilmenitsafsızlıkları                                                                                                                                     |

### 3.2. Gemolojik Özellikler

Tablo 2’de, mavi süstaşlarının kristal sistemleri, karakteristik absorbsiyon bantları, pleokroizma özellikleri, kırılma indisi değerleri ve içerdikleri inklüzyon türleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Tabloda yer alan mavi renkli süstaşları, mineralojik çeşitlilikleri ve kimyasal bileşimlerindeki farklılıklar nedeniyle birbirinden oldukça farklı gemolojik özellikler sergilemektedir. Mavi

kalsedon, akuamarin, mavi elmas, lapislazuli, sodalit, larimar, azurit, kyanit, turkuvaz ve mavi topaz gibi minerallerin tümü mavi tonlar sunsa da, renklenme mekanizmaları hem yapısal hem de kimyasal düzeyde farklı süreçlere dayanmaktadır. Kristal sistemleri trigonal (safir ve kalsedon), hekzagonal (akuamarin), kübik (mavi elmas, sodalit ve lapislazuli), triklinik (larimar, kyanit, turkuvaz) ve ortorombik (topaz) gibi geniş bir çeşitlilik göstermekte olup, bu durum optik davranışlarını ve pleokroizma derecelerini etkilemektedir. Pleokroizma özellikle safir, akuamarin, azurit ve kyanit gibi minerallerde belirgin olup açık mavi, mavi ve yeşilimsi tonlarda gözlenebilmektedir. Kırılma indisi (RI) değerleri 1.33–1.83 arasında değişmekte olup, yüksek RI değerleri (örneğin mavi elmas, safir, azurit, kyanit ve topaz) daha güçlü parlaklık ve ışık oyunları yaratmaktadır. İnklüzyon tipleri de mineral türüne göre değişmekte; mavi elmasta grafit kapanımları; safirde rutil iğnecikleri, nefelin, spinel, zirkon, ilmenit safsızlıkları (Khamloet, et al., 2014); kalsedonda lifsi ve bantlı yapı, akuamarinde (Katı, et al., 2012)  $Fe^{2+}$  ve  $Fe^{3+}$  safsızlıkları (Nikbakht, et al., 2016); lapislazuli ve sodalitte pirit kapanımları; turkuvaz ve azuritte bakır safsızlıkları, kyanitte  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Ti^{4+}$  safsızlıkları ve mavi topazda ise  $TiO_6$  ve  $Cr^{3+}$  safsızlıkları (Nikbakht, et al., 2016) tipiktir. Genel olarak, tabloda verilen mineraller mavi rengin tek bir mekanizma ile açıklanamayacağını; kristal yapısı, iz element içeriği, optik özellikler ve inklüzyon türlerinin tamamının renklenmede etkin rol oynadığını göstermektedir (Tablo 2, Tablo 3).

**Tablo 2. Mavi Renkli Süstaşlarının Gemolojik Özellikleri (Kristal Sistemi, Absorpsiyon spektrumu, Pleokroizma, Kırılma İndisi ve İnklüzyon Türleri).** (Absorpsiyon spektrumları, Mavi elmas: [https://gropikipedia.com/page/Blue\\_diamond](https://gropikipedia.com/page/Blue_diamond); <https://www.gia.edu/doc/GG-SP15-Shigley.pdf>, Safir: Moulton, et al., 2019; Akuamarin: <https://www.gia.edu/gems-gemology/fall-2014-gemnews-aquamarine-dichroism>; Topaz: Isotani, et al., 2013; Lapislazuli: Kumar, et al., 2025; Sodalit: Chukanov, et al., 2020; Larimar: Klopogge, et al., 2016; Azurit: Aceto, et al., 2014; Kyanit: Chen, et al., 2025; Turkuvaz: <https://www.gia.edu/doc/Polymer-Impregnated-Turquoise.pdf>; Mavi Kalsedon: Çetin, et al., 2013'ten alınmıştır).

| Süstaşı    | Kristal Sistemi ve Ailesi  | Absorpsiyon spektrumu (nm) | Pleokroizma                              | Kırılma İndisi (RI) | İnklüzyon ve Safsızlık Türleri                         |
|------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|
| Mavi elmas | Kübik                      | 230, 415, 496, 503         | Yok                                      | 2,417-2,419         | Grafit inklüzyonları                                   |
| Safir      | Trigonal/<br>Korund        | 268, 400, 450, 800         | Belirgin (mavi-yeşilimsi mavi)           | 1.768–1.772         | Rutil iğneleri, nefelin, ilmenit, spinel inklüzyonları |
| Akuamarin  | Hekzagonal/<br>Beril       | 370, 427                   | Zayıftan belirgine (mavi-yeşilimsi mavi) | 1.577–1.583         | Mika, hematit, biyotit, rutil, pirit                   |
| Mavi Topaz | Ortorombik/<br>Topaz grubu | 620                        | Zayıf (Açık mavi)                        | 1.606–1.629         | $TiO_6$ ve $Cr^{3+}$ safsızlıkları                     |

|                               |                                       |              |                                         |             |                                                                         |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------|
| LapisLazuli                   | Kübik/<br>Lazurit                     | 595-620      | Yok                                     | 1.502–1.522 | S <sub>3</sub> <sup>-</sup> safsızlığı                                  |
| Sodalit                       | Kübik/sodalit<br>grubu                | 450-800      | Yok                                     | 1.483–1.487 | Pirit kapanımları                                                       |
| Larimar<br>(Mavi<br>Pektolit) | Triklinik/<br>inosilikat              | 400–480, 630 | Yok                                     | 1.594-1.610 | Cu <sup>2+</sup> safsızlığı                                             |
| Azurit                        | Monoklinik/<br>Karbonat               | 640          | Belirgin<br>(açık mavi-<br>mavi)        | 1.730–1.838 | Cu <sup>2+</sup> safsızlıkları                                          |
| Kyanit<br>(Mavi çeşit)        | Triklinik/<br>Nezosilikat             | 600          | Belirgin<br>(mavi-<br>mavimsi<br>yeşil) | 1.712–1.718 | Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Ti <sup>4+</sup><br>safsızlıkları |
| Turkuvaz                      | Triklinik/<br>Fosfat                  | 430, 460     | Zayıf                                   | 1.610–1.650 | Cu <sup>2+</sup> safsızlığı                                             |
| Mavi<br>Kalsedon              | Trigonal/<br>Mikrokristalin<br>Kuvars | 210, 225–275 | Yok                                     | 1.530–1.543 | Mavi dumortierit,<br>Turmalin ve<br>İlmenit<br>kapanımları              |

**Tablo 3. Mavi Renkli Süstaşlarının Gemolojik Özellikleri (Parlaklık, UV-Flüoresans ve Dilinim)**

| Mineral                | Parlaklık<br>(Luster)    | UV Floresans (Kısa Dalga /<br>Uzun Dalga)                                   | Dilinim                                                  |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Mavi elmas             | Elmas parıltılı          | Genellikle zayıf ila güçlü<br>sarı (bor varlığına bağlı<br>olarak değişken) | {111} üzerinde Mükemmel<br>dilinimli                     |
| Safir                  | Cam parıltılı            | Genellikle zayıf veya yok;<br>bazı örneklerde sarımsı<br>yeşil              | Zayıf dilinimli                                          |
| Akuamarin              | Cam parıltılı            | Genellikle floresans<br>göstermez                                           | {0001} üzerinde kusurlu<br>dilinim                       |
| Mavi Topaz             | Cam parıltılı            | Kısa UV altında altın sarısı;<br>uzun UV altında krem<br>rengi              | {001} üzerinde mükemmel<br>dilinim                       |
| LapisLazuli            | Mat, camsı,<br>yağsı     | Genellikle yok                                                              | {110} üzerinde kusurlu                                   |
| Sodalit                | Camsı, yağsı             | Güçlü turuncu-kırmızı<br>floresans (SW ve LW)                               | {110} üzerinde zayıf dilinim                             |
| Larimar                | Camsı, ipeksi            | Genelde floresans yok veya<br>çok zayıf                                     | {100} ve {001} üzerinde<br>mükemmel                      |
| Azurit                 | Camsı parıltılı          | Zayıf yeşilimsi floresans                                                   | {011} için mükemmel, {100}<br>için orta, {110} için kötü |
| Kyanit<br>(mavi çeşit) | Camsı, inci<br>parıltılı | Genelde floresans yok                                                       | {100} üzerinde Mükemmel,<br>{010} üzerinde iyi           |
| Turkuvaz               | Mumsu, mat               | Genelde floresans yok                                                       | {001} üzerinde mükemmel,<br>{010} üzerinde iyi           |
| Mavi<br>Kalsedon       | Mumsu, ipeksi            | Genellikle yok; nadiren<br>zayıf beyaz                                      | Dilinim yok                                              |

#### 4. SONUÇLAR

Bu derleme çalışması, doğal mavi renkli süstaşlarının mineralojik, kimyasal ve gemolojik özelliklerini karşılaştırmalı olarak ele almıştır. Sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

Literatür, mavi süstaşlarının hem makroskobik hem mikroskobik özelliklerinin mineral yapıya ve jeokimyasal süreçlere bağlı olarak büyük çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Mavi taşların tanımlanması, yüksek çözünürlüklü spektroskopik ve mikroskobik yöntemlerin birlikte kullanılmasını gerektirmektedir.

Mavi rengin oluşumunda rol oynayan mekanizmaların mineral türüne göre belirgin biçimde farklılaştığını söyleyebiliriz. Karşılaştırılan mineraller; kristal yapı çeşitliliği, geçiş metalleri içerikleri, inklüzyon tipleri ve optik davranışları bakımından geniş bir yelpaze sunmakta olup, mavi renk oluşumunun tek bir faktörle açıklanamayacağı anlaşılmaktadır. Safir, akuamarin, kyanit ve topaz gibi minerallerde mavi rengin başlıca nedeni  $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Ti}^{4+}$  veya  $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{Fe}^{2+}$  çiftleri arasındaki yük transferi mekanizmalarıdır. Buna karşılık, azurit, larimar ve turkuvaz gibi bakır içeren minerallerde renklenme doğrudan  $\text{Cu}^{2+}$  iyonlarının oktahedral koordinasyonundaki varlığıyla ilişkilidir. Lapislazulide mavi ton  $\text{S}_3^-$  radikal iyonu ve sodalitte ise interstisyel  $\text{O}^-$  iyonu tarafından belirlenmektedir. Kriptokristalin kuvars grubu üyesi mavi kalsedonda renklenme, dumortierit, turmalin ve ilmenit gibi mikroskobik mineral fazlarının dağılımıyla bağlantılıdır.

Gemolojik parametreler de mineral türleri arasında belirgin farklılıklar göstermektedir. Kırılma indisleri 1.48–1.83 aralığında değişmekte olup özellikle safir, azurit, kyanit ve topaz gibi yüksek RI değerine sahip mineraller daha güçlü parlaklık etkisi sergilemektedir. Pleokroizma davranışı ise yalnızca belirli minerallerde (safir, akuamarin, azurit, kyanit) görülmekte; kalsedon, turkuvaz, lapislazuli ve sodalitte gözlenmemektedir. UV-flüoresans tepkileri açısından sodalit güçlü turuncu-kırmızı floresansı ile ayırt edilirken, topaz kısa dalga UV altında altın sarısı tepki göstermektedir. Lapislazuli, turkuvaz ve kalsedon ise çoğunlukla floresans göstermemektedir. Ayrıca bazı minerallerdeki belirgin dilinim (özellikle topaz, larimar, azurit ve kyanit) kesim işlemlerini doğrudan etkilemekte ve gemolojik sınıflandırmada kritik rol oynamaktadır.

Ayrıca mavi renkli süstaşlarının ekonomik değerleri, optik berraklık, renk dağılımı ve nadirlik gibi faktörlerin birleşimiyle belirlenmektedir. Nitekim mavi elmas, safir ve akuamarin gibi nadir bulunan kristalin mineraller genellikle daha yüksek piyasa değerine sahipken, mavi kalsedon ve sodalit daha geniş yatak dağılımı nedeniyle orta değerde yer almaktadır.

Sonuç olarak, mavi süstaşlarının mineralojik ve optik karakterleri hem oluşum ortamlarının fiziksel ve kimyasal koşullarını yansıtmakta hem de gemolojik tanımlama süreçlerine önemli katkılar sağlamaktadır.

## KAYNAKLAR

- Aceto, M., Agostino, A., Fenoglio, G., Idone, A., Gulmini, M., Picollo, M., Ricciardi, P., and Delaney, J. K. (2014). Characterisation of colourants on illuminated manuscripts by portable fibreoptic UV-visible-NIR reflectancespectrophotometry. *Analytical methods*, 6(5), 1488-1500.
- Alekseyev, V. A., Korost, D. V., Stepanov, N. V., Mokhov, A. V., and Gromyak, I. N. (2025). Physico-Chemical Mechanisms of Formation of Concentrically Banded Agates in Basalts: Hypotheses and Experiments. *Geochemistry International*, 63(3), 259-273.
- Başbüyük, Z., Kaydu Akbudak, İ. and Gürbüz, M. (2020). Mineralogical, geochemical and gemological investigation of Artova Ch-chalcedonies, Tokat – Turkey. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 36(1), 77–92. <https://doi.org/10.24425/gsm.2020.132551>
- Bootkul, D., Chaiwai, C., Tippawan, U., Wanthanachaisaeng, B., and Intarasiri, S. (2015). Analysis and modification of blue sapphires from Rwanda by ionbeam techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Material and Atoms*, 365, 288-293.
- Chen, X., Guo, Y., and Gao, M. (2025). Study on the Chromogenic Mechanism of Blue Kyanite from Coronel Murta, Minas Gerais, Brazil. *Crystals*, 15(4), 302. <https://doi.org/10.3390/cryst15040302>
- Chukanov, N. V., Sapozhnikov, A. N., Shendrik, R. Y., Vigasina, M. F., and Steudel, R. (2020). Spectroscopic and Crystal-Chemical Features of Sodalite-Group Minerals from Gem Lazurite Deposits. *Minerals*, 10(11), 1042. <https://doi.org/10.3390/min10111042>
- Çetin, A., Okutan, M., İçelli, O., Yalçın, Z., San, S. E., Kibar, R., and Pesen, E. (2013). Electrical and optical properties of chalcedony and striped chalcedony. *Vacuum*, 97, 75-80.
- Çoban, E. (2020). Afyonkarahisar-Seydiler süstaşı opallerinin karakterizasyonu ve ekonomik potansiyeli (Yüksek lisans tezi). Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya, Türkiye, 133s.
- Flörke, O. W., Köhler-Herbertz, B., Langer, K., and Tönges, I. (1982). Water in micro crystalline quartz of volcanic origin: agates. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(4), 324-333.
- Fritsch, E., and Rossman, G. R. (1988). An update on color in gems. Part 3: Colors caused by bandgaps and physical phenomena. *Gems&Gemology*, 24(2), 81-102.
- Groat, L.A., Rossman, G.R., Dyar, M.D., Turner, D.J., Piccoli, P.M.B., Schultz, A.J. and Ottolini, L. (2010) Crystalchemistry of dark blue aquamarine from the True Blue showing, Yukon Territory, Canada. *Canadian Mineralogist*, 48, 597-613.
- Götze, J., Gaft, M., and Möckel, R., (2015). Uranium and uranyl luminescence in agate/chalcedony. *Mineralogical Magazine*, 79(4), 983-993.
- Götze, J., Möckel, R., and Pan, Y. (2020). Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Agate—A Review. *Minerals*, 10(11), 1037. <https://doi.org/10.3390/min10111037>
- Güney, H., ve Hatipoğlu, M. (2022). Süstaşı oluşumu, işleme ve inceleme yöntemlerinin antik dönem ve günümüz kuyumculuk-takı tasarımındaki yeri. *İdil*, 11(99), 1557–1570. <https://doi.org/10.7816/idil-11-99-03>
- Isotani, S., Matsuoka, M., and Albuquerque, A. (2013). Isothermal annealing of a 620 nm optical absorption band in Brazilian topaz crystals. *Physica B: Condensed Matter*, 415, 38-43.
- Katı, M. I., Türemis, M., Keskin, I. C., Tastekin, B., Kibar, R., Çetin, A., and Can, N. (2012). Luminescence behaviour of beryl (aquamarine variety) from Turkey. *Journal of Luminescence*, 132(10), 2599-2602.
- Kaydu Akbudak, İ., Başbüyük Z. ve Gürbüz, M. (2018). “Yozgat “Aydıncık” kalsedon-ametist oluşumlarının mineralojisi-petrografisi ve ekonomikliğinin incelenmesi.” DÜMF, Mühendislik Dergisi 9:1 s. 313-324.
- Kaydu Akbudak, İ., Gürbüz, M., Başbüyük, Z., Hatipoğlu, M., Önal, A.Ö., İşler, F. (2021). Mineralogical and Gemological Characteristics of Metaophiolite Hosted Corundum (Malatya-Türkiye). *Sak. Univ. J. Sci.* 25, 288–296.
- Kaydu Akbudak, İ., Başbüyük, Z., Ekincioglu, G., ve Ekdur, E., (2023). Kırşehir Ve Aksaray Bölgesi Bantlı Traverten Oluşumlarının Süstaşı Olarak Kullanımı. *Uluslararası Disiplinlerarası ve Kültürlerarası Sanat*, 8(16), 1-12.

- Khamloet, P., Pisutha-Arnond, V., and Sutthirath, C. (2014). Mineral inclusions in sapphire from the basalt-related deposit in BoPhloi, Kanchanaburi, western Thailand: Indication of their genesis. *Russian Geology and Geophysics*, 55(9), 1087-1102.
- Kloprogge, J. T., Wood, B. J., and Desk, S. (2016). X-Ray Photoelectron Spectroscopy Study Of So-Called “Larimar”, Blue Pectolite From The Dominican Republic. *Sdrp Journal Of Earth Sciences & Environmental Studies*, 1(2).
- Kumar, S. V., Jaiswal, V. K., Mahajan, A. S., Bhatnagar, M. K., and Rajeswari, L. (2025). Multianalytical Characterization of Lapis Lazuli Pigments of Ajanta Murals for Identification and Its Geological Provenance. *Journal of Raman Spectroscopy*.
- Lin, J., Chen, N., Huang, D. and Pan, Y. (2013) Ironpairs in beryl: New insights from electron paramagnetic resonance and synchrotron X-ray absorption spectroscopy, and ab-initio calculations. *American Mineralogist*, 98, 1745–1753.
- Lum, J. E. (2017). A mineralogical and geochemical characterisation of beryl from Southern Africa (Publication No. 28287848) [Doctoral dissertation, ProQuest Dissertations & Theses Global]. ProQuest. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/mineralogical-geochemical-characterisation-beryl/docview/2528580222/se-2>
- Moulton, P. F., Cederberg, J. G., Stevens, K. T., Foundos, G., Koselja, M., and Precilikova, J. (2019). Characterization of absorption bands in Ti: sapphire crystals. *Optical Materials Express*, 9(5), 2216-2251.
- Moxon, T., and Palyanova, G. (2020). Agate Genesis: A Continuing Enigma. *Minerals*, 10(11), 953. <https://doi.org/10.3390/min10110953>
- Nikbakht, T., Kakuee, O., and Lamehi-Rachti, M. (2016). Study of the ionoluminescence behavior of the gemstones: Beryl (aquamarine variety), opal, and topaz. *Journal of Luminescence*, 171, 154-158.
- Özbay Candan, E., Kaydu Akbudak, İ., Başbüyük, Z., Ekincioglu, G. (2022). Tokat Nebiköy Kalsedonlarının Mineralojik-Petrografik ve Gemolojik İncelemesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 65(3), 287-296. <https://doi.org/10.25288/tjb.1121899>
- Papineau, D. (2024). Chemically Oscillating Reactions as a New Model for the Formation of Mineral Patterns in Agate Geodes and Concretions. *Minerals*, 14(2), 203. <https://doi.org/10.3390/min14020203>
- Palke, A. C., Renfro, N. D., Hapeman, J. R., and Berg, R. B. (2023). Gemological Characterization Of Montana Sapphire From The Secondary Deposits At Rock Creek, Missouri River, And Dry Cottonwood Creek. *Gems & Gemology*, 59(1).
- Regier, M. E., Smit, K. V., Chalk, T. B., Stachel, T., Stern, R. A., Smith, E. M., Foster, G. L., Bussweiler, Y., DeBuhr C., Burnham, A. D., Harris, J. W. and Pearson, D. G. (2023). Boron isotopes in blue diamond record seawater-derived fluids in the lower mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 602, 117923.
- Skalwold, E. A., and Bassett, W. A. (2016). Blue minerals: exploring cause&effect. *Rocks&Minerals*, 91(1), 61-77.
- Gemdat.org. (t.y.). *Blue Diamond*. 10 Kasım 2025 tarihinde <https://www.gemdat.org/photo-4295.html> adresinden erişilmiştir.
- GIA. (t.y.). *Aquamarine dichroism – Gemnews (Fall 2014)*. 10 Kasım 2025 tarihinde <https://www.gia.edu/gems-gemology/fall-2014-gemnews-aquamarine-dichroism> adresinden erişilmiştir.
- GIA. (t.y.). *GG-SP15-Shigley* [PDF]. 10 Kasım 2025 tarihinde <https://www.gia.edu/doc/GG-SP15-Shigley.pdf> adresinden erişilmiştir.
- GIA. (t.y.). *Polymer-Impregnated Turquoise* [PDF]. 11 Kasım 2025 tarihinde <https://www.gia.edu/doc/Polymer-Impregnated-Turquoise.pdf> adresinden erişilmiştir.
- Grokikipedia.com. (t.y.). *Blue diamond*. 10 Kasım 2025 tarihinde [https://grokipedia.com/page/Blue\\_diamond](https://grokipedia.com/page/Blue_diamond) adresinden erişilmiştir.
- Mindat.org. (t.y.). *[Sapphire] – ID: 1136*. 20 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-1136.html> adresinden erişilmiştir.
- Mindat.org. (t.y.). *[Aquamarine] – ID: 289*. 20 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-289.html> adresinden erişilmiştir.

- Mindat.org. (t.y.). [*Blue Topaz*] – ID: 3996. 20 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-3996.html> adresinden erişilmiştir.
- Mindat.org. (t.y.). [*Lapis Lazuli*] – ID: 2330. 20 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-2330.html> adresinden erişilmiştir.
- Mindat.org. (t.y.). [*Sodalite*] – ID: 3701. 20 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-3701.html> adresinden erişilmiştir.
- Mindat.org. (t.y.). [*Blue Pectolite*] – ID: 29025. 20 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-29025.html> adresinden erişilmiştir.
- Mindat.org. (t.y.). [*Azurite*] – ID: 447. 20 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-447.html> adresinden erişilmiştir.
- Mindat.org. (t.y.). [*Kyanite*] – ID: 2303. 23 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-2303.html> adresinden erişilmiştir.
- Mindat.org. (t.y.). [*Turquoise*] – ID: 4060. 23 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-4060.html> adresinden erişilmiştir.
- Mindat.org. (t.y.). [*Chalcedony*] – ID: 960. 23 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-960.html> adresinden erişilmiştir.
- Mindat.org. (t.y.). [*Star Sapphire*] – ID: 30580. 23 Ekim 2025 tarihinde <https://www.mindat.org/min-30580.html> adresinden erişilmiştir.

# GEOPOLİMER BETON VE GELENEKSEL BETONUN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ: MALZEME BİLİMİ, PERFORMANS VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BOYUTLARI

Serdar Korkmaz<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

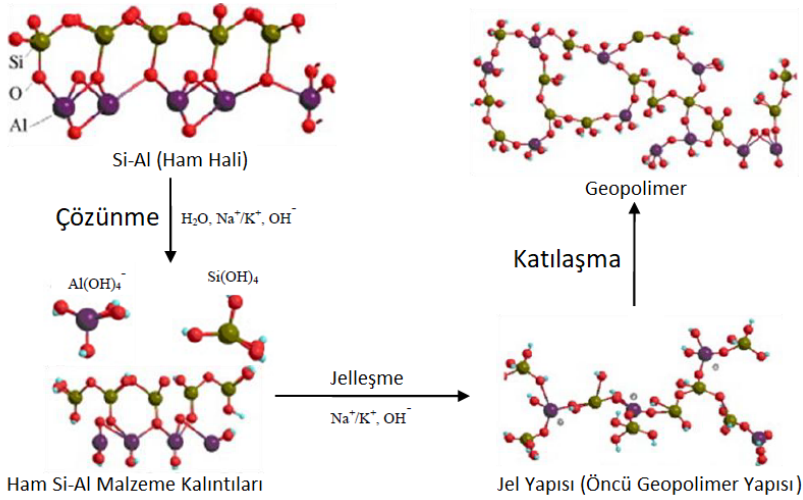
Beton, modern yapı sektörünün en yaygın kullanılan yapı malzemesi olarak yüzyılı aşkın süredir altyapı ve üstyapı projelerinin temel bileşenini oluşturmaktadır. Beton; su, agrega, çimento ve gerektiğinde katkı maddeleri (kimyasal ve mineral) kullanılarak üretilen önemli bir yapı malzemesidir. Beton içerisinde kullanılan malzemelerden olan çimento elde ediliş ve üretim bakımından diğer malzemelerden ayrı tutulabilir. Çünkü çimento üretimi  $\approx 1450^{\circ}\text{C}$  gibi yüksek bir sıcaklık gerektirmektedir. Bu sıcaklıkta gerçekleşen üretim sürecinde oluşan kalsinasyon reaksiyonları, toplam küresel  $\text{CO}_2$  emisyonunun yaklaşık %5–8’ine katkı yapmaktadır. Çimento yerine alternatif malzemelerin kullanımıyla çimentoda klinker ikamesinin ortalama seviyesini %40’a çıkarmak, yıllık 400 milyon ton  $\text{CO}_2$  emisyonunu önleyebilir (Scrivener vd., 2018). Ayrıca bu üretim yüksek enerji tüketimine de neden olmaktadır. Bu durum gerek araştırmacıların gerekse AR-GE alanında çalışan kişilerin çevresel etkileri azaltacak alternatif bağlayıcı sistemlere olan ilgisini artırmıştır. Geopolimer beton üretim bu süreçte bir alternatif sunmaktadır. Geopolimer beton; aluminosilikat kaynaklı malzemelerin alkali aktivasyonu ile oluşan polimerik bir matris yapısı sayesinde hem düşük karbon ayak izi hem de yüksek dayanıklılık özellikleri sunmaktadır (Davidovits, 1991; Provis & van Deventer, 2014). Ayrıca geopolimer beton endüstriyel atıkların değerlendirilmesine de olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada geopolimer beton ile geleneksel beton, malzeme bilimi, üretim süreçleri, mekanik performans ve sürdürülebilirlik bağlamında kapsamlı şekilde karşılaştırılmaktadır.

## 2. GEOPOLİMERLEŞME MEKANİZMASI

Geopolimer beton, alümina ve silika bakımından zengin ham maddelerin alkali aktivasyonu ile oluşan üç boyutlu bir polimerik yapıdan meydana gelmektedir. Geopolimerizasyon, üç boyutlu makromoleküler yapının temel birim yapıları aracılığıyla gerçekleştirilen ekzotermik bir işlemdir (Davidovits, 1991). Başka bir ifadeyle geopolimer mikro yapısı kristal değil, amorf ila yarı

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman Meslek Yüksek Okulu, ORCID ID: 0000-0002-4247-3813; e-mail: skorkmaz@ahievran.edu.tr

kristal yapıdadır. Şekil 1’ de geopolimerizasyon sürecinin çözünme, jelleşme ve katılaşma süreçleri bulunmaktadır.



**Şekil 1. Geopolimerleşme Reaksiyon Mekanizması (Yao vd., 2009)**

Şekil 1’ de geopolimer reaksiyon mekanizması verilmiştir. Çözünme aşamasında, Si-Al hammaddeleri alkali çözelti ile temas ettiğinde hem Si hem de Al türleri üretilir. Xu (2002), Si ve Al oluşumunun derecesinin;

- alkali çözeltinin konsantrasyonu,
- alkali çözeltideki alkali metal katyonları (örneğin  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ),
- karıştırma hızı ve süresi ile
- Si-Al hammaddelerinin içsel özellikleri (örneğin yapı ve bileşim) ile bağlantılı olduğunu belirtmiştir.

Belirtilen tüm bu faktörler arasında, alkali çözeltilerin konsantrasyonu ve Si-Al hammaddelerinin içsel özelliklerinin baskın olduğu düşünülmektedir.

Geopolimer bağlayıcılar, “alkali aktivasyon” mekanizması doğrultusunda alüminosilikat içeren ham maddelerin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin) yüksek pH’lı çözeltiler tarafından çözünmesi ve polikondenzasyon reaksiyonları sonucunda üç boyutlu bir N–A–S–H (sodyum alüminosilikat hidrat) veya K–A–S–H jel matrisi oluşturmasıyla meydana gelir (Provis, 2018). Bu bağ yapısı, Portland çimentosundaki C–S–H jelinden daha homojen ve amorf bir karakter sergiler. Ayrıca  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (CH) oluşmaması, geopolimer malzemeyi birçok kimyasal saldırıya karşı dayanıklı hâle getirir. Çünkü CH ikincil reaksiyon oluşturarak betona olumlu etki yapabildiği gibi; karbonatlaşma gibi olumsuz sonuçlar da doğurabilir.

Uçucu kül ve granül yüksek fırın cürufu gibi mineral katkı maddeleri, betonun kalitesini iyileştirmek için betona katılır (Galván-Ruiz, 2009; Saeki ve

Monteiro, 2005). Örneğin, mineral katkı maddeleri hidratasyon ısını azaltır, taze betonun akışkanlığını iyileştirir ve alkali silika reaksiyonunu kontrol eder. Şekil 2’ de bazı mineral katkıları verilmiştir.



**Şekil 2. Mineral Katkılar (Türk Çimento, 2021)**

Katkı maddeleri ekleyerek çimento miktarını azaltmak mümkündür. Bu sayede karışımdaki kalsiyum hidroksit seviyesi düşürülebilir. Ayrıca mineral katkı maddeleri, kalsiyum hidroksiti de tüketen puzolanik reaksiyona neden olur.

Son araştırmalar, kalsiyum hidroksitin agresif ortamlara maruz kalan betonun stabilitesinde önemli bir rol oynadığını doğrulamıştır (Mehta ve Monteiro, 2006). Betondaki kalsiyum hidroksit karbonatlaşma hızını etkilediğinden kalsiyum hidroksit mevcut olduğu sürece çelik donatı korozyona karşı pasif durumda olacaktır (Saeki ve Nagataki, 1997). Ayrıca, geçiş bölgesinin yoğunluğu da kalsiyum hidroksit miktarından etkilenir. Bu nedenle, beton karışımının uygun düzeyde katkı maddesi içermesi, ancak kalsiyum hidroksitin yararlı etkilerini tehlikeye atmayacak düzeyde olması için sağlıklı bir denge sağlanmalıdır. Bu katkı maddelerinin betondaki performansını değerlendirmek için, betondaki kalsiyum hidroksit miktarını tahmin etmek gerekir.

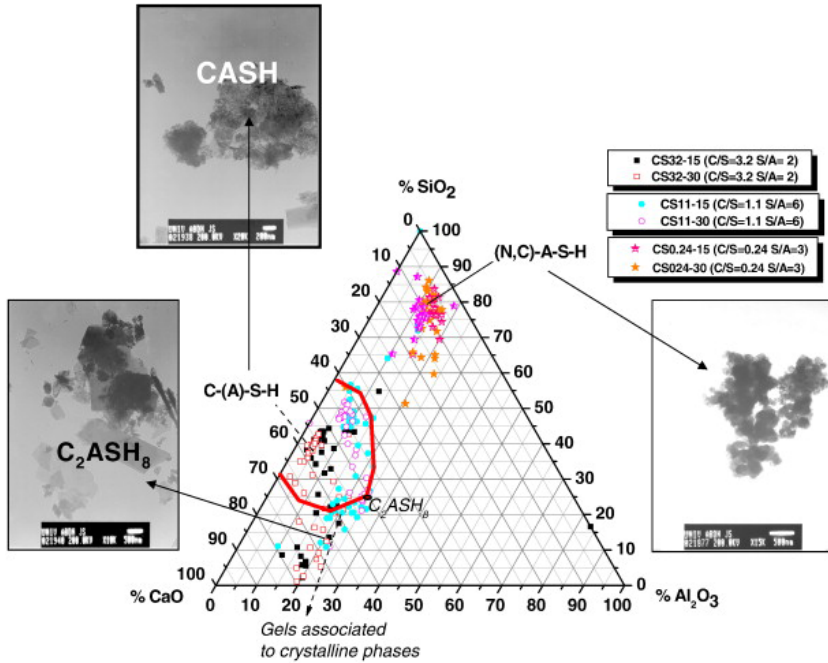
Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi endüstriyel yan ürünler geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkali aktivatörler, aluminosilikat yapıyı çözerek polikondensasyon reaksiyonunu başlatır. Oluşan jeolojik bağlayıcı, C-S-H jelinden farklı olarak N-A-S-H veya K-A-S-H bazlı amorf

bir yapıya sahiptir. Bu kimyasal yapı, geopolimer betonun asit ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi birçok alanda üstün performans göstermesini sağlar.

Geopolimerleşme üç temel reaksiyon adımından oluşur. Bunlar;

- Çözünme: Aluminosilikat yüzeylerinden  $AlO_4^-$  ve  $SiO_4^{4-}$  monomerlerinin ayrılması,
- Oligomerizasyon: Çözünmüş türlerin lineer veya halka şeklinde dizilim geliştirmesi,
- Polikondensasyon: N-A-S-H veya C-A-S-H jel matrisinin oluşumudur.

Bu yapı, Portland çimentosundaki C-S-H jelinden daha üç boyutlu ve kimyasal saldırılara dayanıklı bir ağ meydana getirir. Şekil 3’ de C-A-S-H ve N-A-S-H analizlerine ilişkin bir görsel verilmiştir.



Şekil 3. C-A-S-H ve N-A-S-H Analizi

Şekil 3 C-A-S-H ve N-A-S-H jellerine ilişkin EDX analizlerinin sonuçlarını göstermektedir. Yüksek ve orta kalsiyumlu ortamlar iki farklı küme gösterir; ilk grup, “C-A-S-H” olarak adlandırılır ve belirtilen bölgedeki bileşim aralığıyla vurgulanır, tek fazlı C-A-S-H jelleri gibi görünür. İlgili parçacık morfolojileri çeşitli kümelerin yanında gösterilir ve morfoloji veya elektron difraksiyonu ile kristalimsi malzeme gözlemlenmez. Kireç açısından daha zengin olan küme, kristalimsi ve amorf fazların karışımıyla ilişkilidir. Bu durumda, EDX bileşimleri jel bileşimlerinin güvenilir göstergeleri olarak kabul edilemez, bunun yerine elektron ışını ile etkileşime giren farklı fazların ortalama bileşimlerini temsil

ediyor olabilir. Nitekim, bu bölgede bir arada var olabilecek fazlar arasında  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve yüksek kireçli C-A-S-H jel bulunmaktadır.

Düşük kalsiyum ortamından elde edilen jeller, ayrı bir bileşim kümesi gösterir. Aslında, ihmal edilebilir düzeyde  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriğine sahip olan ve neredeyse  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  düzlemi üzerinde yer alan yüksek kalsiyum içeren jellerin aksine, bu bileşimler diyagramın düzleminin üzerinde yükselir ve buna bağlı olarak belirli bir  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriği ile ilişkilidir. Kalsiyum ikameli N-A-S-H jeller ((N,C)-A-S-H) olarak tanımlanan bu küme, C-A-S-H jelinin gösterdiği morfolojiden biraz farklı, küresel morfolojiye sahip tek bir jel ile ilişkilidir (García-Lodeiro vd., 2011).

### 2.1. Aluminosilikat Kaynakları

Geopolimerler genellikle şu üç temel aluminosilikat kaynağından elde edilir. Bunlar:

- Uçucu kül (FA, Class F),
- Yüksek fırın cürufu (GGBFS),
- Metakaolin (MK)' dir.

Bu malzemeler, amorf yapıli  $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$  bağlarını içerir ve yüksek pH altında çözünerek polikondensasyon reaksiyonlarına girer.

### 2.2. Alkali Aktivatörler

Geopolimer üretiminde kullanılan en yaygın aktivatör sistemleri;

- $\text{NaOH}$  veya  $\text{KOH}$  çözeltileri,
- Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ),
- Potasyum silikat ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) olarak ifade edilebilir.

Aktivatörün molar derişimi,  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı ve viskozitesi polimerleşme hızını doğrudan etkileyen temel unsurlardır.

## 3. GELENEKSEL BETONA GENEL BAKIŞ

Beton; çimento, su, agrega ve gerektiğinde kimyasal ve mineral katkıların kullanılması ile üretilir. Beton içerisindeki en önemli bileşenlerden birisi portland çimentosudur. Portland çimentosu, kireçtaşı ve kilin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilen klinkerin öğütülmesi sonucu oluşur. Bu süreçte yüksek miktarda  $\text{CO}_2$  açığa çıkmakta ve enerji yoğun bir üretim gerçekleştirilmektedir. Portland çimentonun su ile hidratasyonu sonucunda C-S-H jeli,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve diğer hidrat ürünleri meydana gelir. Bu hidrat ürünleri betonun dayanımını belirlerken,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  gibi bileşenler özellikle kimyasal dayanıklılık açısından zayıf bir nokta oluşturmaktadır. Buna rağmen geleneksel beton, geniş standart altyapısı, üretim kolaylığı ve ekonomikliği nedeniyle halen yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çimento üretiminde klinker fazları bulunmaktadır. Bu fazlarda çimento ana bileşenlerinin üretimi gerçekleşir. Bunlar;

- $C_3S$ , Trikalsiyum silikat (alite),
- $C_2S$ , Dikalsiyum silikat (belite),
- $C_3A$ , Trikalsiyum alüminat,
- $C_4AF$ ’ Tetrakalsiyum alüminoferrit’ dir.

Tablo 1’ de çimento ana bileşenleri ve özellikleri verilmiştir.

**Tablo 1. Çimento Ana Bileşenleri ve Özellikleri**

|                           | Çimento Ana Bileşenlerinin Özellikleri |                  |                     |                   |
|---------------------------|----------------------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                           | C <sub>3</sub> S                       | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A    | C <sub>4</sub> AF |
| Reaksiyon Hızı            | Orta                                   | Yavaş            | Hızlı               | Orta              |
| Hidratasyon Isısı         | Orta<br>120 kal/g                      | Az<br>62 kal/g   | Çok<br>207 kal/g    | Orta<br>100 kal/g |
| Çimento Hacmine Oranı (%) | 55-65                                  | 15-20            | Yaklaşık olarak %20 |                   |
| Bağlayıcılık Değeri       |                                        |                  |                     |                   |
| Erken Yaş                 | Yüksek                                 | Düşük            | Düşük               | Düşük             |
| İleri Yaş                 | Yüksek                                 | Yüksek           | Düşük               | Düşük             |

Tablo 1’ e bakıldığında  $C_3S$  ve  $C_2S$ ’ in basınç dayanımı ve bağlayıcılık değerlerine etki ettiği;  $C_3A$  ve  $C_4AF$ ’ nin ise erken yaş ve ileri yaş bağlayıcılık değerlerine düşük etki ettiği görülmektedir.  $C_3S$ , çimento hacminin yaklaşık %55-65’ ini oluşturur. Erken dayanıma etkisi vardır.  $C_2S$ , Çimento hacminin yaklaşık %15-20’ sini oluşturur. Geç dayanıma etkisi vardır.  $C_3A$  ve  $C_4AF$  çimento içerisinde bulunan alüminatlardır. Çimentonun yaklaşık %20’ sini oluştururlar.  $C_4AF$ , çimentoya ve klinkere renk veren madde olarak bilinir.  $C_3A$  ise beton priz süresini etkileyen en önemli bileşendir. Hidratasyon esnasında yüksek oranda ısı ortaya çıkar.

Betona farklı etkiler sağlayan bu dört bileşen çimento üretimindeki farklı sıcaklıklarda meydana gelir. Su ile reaksiyona girdiklerinde;

- $C-S-H$  jeli,
- $Ca(OH)_2$ ,
- Etrenjit oluşumu gerçekleşir.

Su ile reaksiyon sonucu oluşan  $Ca(OH)_2$  betonun kimyasal dayanıklılığı zayıflatan bir üründür. CH (kalsiyum hidroksit) dayanıma etkisi olmayan, ancak beton içindeki bazik yapıyı sağlayan üründür. Zayıf yapısı ve aderansı zayıflatıcı etkisi nedeniyle gerekenden fazlası istenmeyen bir üründür. CH genelde boşluklarda ve çimento hamuru-agrega arayüzeylerinde birikir. Hidrate olan ürünlerin yaklaşık %20’sini oluşturur. Suda çözünür ve betonda

porozitenin sebeplerinden birisidir. Katkılı çimentolarla yapılan betonlarda CH oranı çok daha düşüktür (Çimsa, 2025).

CH, Mutlaka bir alümin ya da silis kaynağı ile birleştirilerek ikincil bir hidrasyon sürecine tabi tutulmalıdır. C–S–H jeli beton içerisindeki dayanımın ana kaynağıdır. Etrenjit ise sülfat saldırısında genişleme ve çatlama oluşturabilir. Geleneksel betonun geopolimer betonla en belirgin farkı  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin yokluğudur.

#### 4. ÜRETİM SÜREÇLERİ KARŞILAŞTIRILMASI

Geopolimer beton üretiminde yüksek sıcaklıklı klinker pişirme süreci bulunmadığından, üretim enerjisi ve karbon emisyonları geleneksel betona kıyasla belirgin biçimde düşüktür. Endüstriyel atıkların hammadde olarak kullanılması hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik verimlilik sağlamaktadır. Geleneksel beton ise enerji yoğun pişirme prosesleri nedeniyle çevre yükü daha yüksek bir malzemedir. Ancak geopolimer üretiminde alkali aktivatörlerin maliyeti bazı durumlarda dezavantaj oluşturabilir. Buna rağmen toplam karbon etkisi değerlendirildiğinde geopolimer beton daha sürdürülebilir bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Tablo 2' de geopolimer beton ve geleneksel beton üretimine ilişkin bir karşılaştırma verilmiştir.

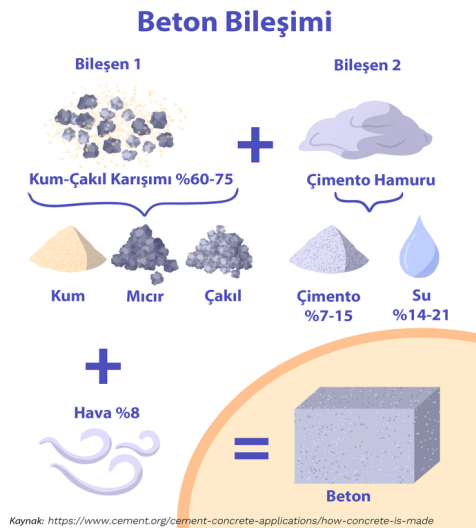
**Tablo 2. Geopolimer Beton – Geleneksel Beton Üretim Süreçleri Karşılaştırma Tablosu**

| Üretim Aşaması                     | Geopolimer Beton                                                                                                                            | Geleneksel Beton                                                                                                                       |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Bağlayıcı Malzeme Hazırlığı</b> | Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi aluminosilikat esaslı atık/yan ürünler hazırlanır. Öğütme veya kurutma çoğu zaman gerekmez. | Kalker + kil karışımı döner fırınlarda $1450^{\circ}\text{C}$ 'de pişirilerek klinker üretilir. Bu en yüksek enerji harcayan aşamadır. |
| <b>Aktivasyon İşlem</b>            | Sodyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkali aktivatör çözeltileri hazırlanır. Çözeltinin molaritesi doğru ayarlanmalıdır.                | Klinker + alçı öğütülerek Portland çimentosu elde edilir. Daha sonra hazır çimento torbalanır.                                         |
| <b>Agrega Temini</b>               | Doğal veya geri dönüştürülmüş agregalar kullanılabilir.                                                                                     | Aynı şekilde doğal veya geri dönüştürülmüş agregalar kullanılır.                                                                       |
| <b>Karıştırma Aşaması</b>          | Aluminosilikat kaynaklı bağlayıcı + alkali aktivatör + agregalar belirli sırayla karıştırılır. Sıcaklık kontrolü önemlidir.                 | Çimento + su + agregalar karıştırılır. Ek olarak kimyasal katkıları eklenir.                                                           |
| <b>İşlenebilirlik</b>              | Aktivasyon çözeltisi miktarı ve molaritesi işlenebilirliği etkiler. Süperakışkanlaştırıcı çoğu zaman kullanılabilir.                        | Su/çimento oranı ve kimyasal katkıları işlenebilirliği belirler.                                                                       |
| <b>Döküm ve Kalıplama</b>          | Geleneksele benzerdir; döküm ve vibrasyon uygulanır.                                                                                        | Aynıdır. Kalıp ve vibrasyon benzer şekilde yapılır.                                                                                    |
| <b>Kür Koşulları</b>               | Genellikle ısı kuru ( $40\text{--}80^{\circ}\text{C}$ ) tercih edilir. Oda sıcaklığında kuru yapılabilen formülasyonlar da vardır.          | Oda sıcaklığında kuru yapılır. İlk 24 saat nem ve sıcaklık kontrolü yeterlidir.                                                        |

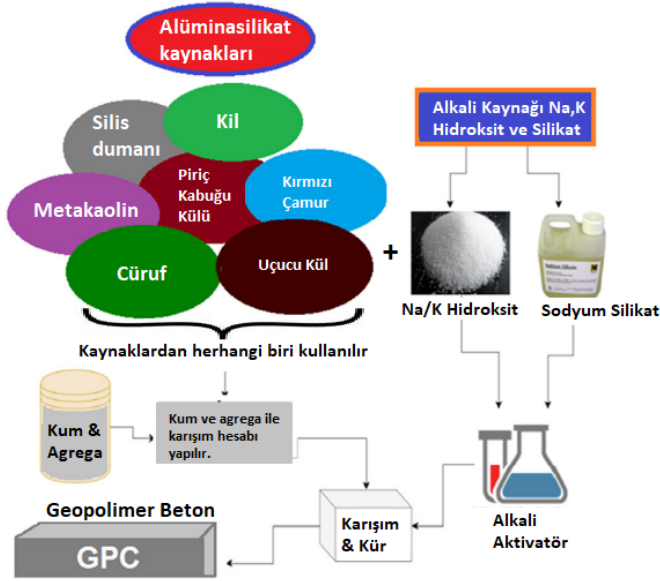
|                               |                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                              |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Erken Dayanım Gelişimi</b> | Isıl kür uygulanan karışımlarda 8–24 saat içinde yüksek dayanım gelişir.                                                                                                                            | Erken dayanım 1–3 gün arasında oluşur ancak 28 gün dayanımı standart kabul edilir.                                                                           |
| <b>Enerji Tüketimi</b>        | Çok düşüktür; yüksek sıcaklıkta klinker üretimi yoktur.                                                                                                                                             | En yüksek enerji tüketimi klinker üretimi sırasında gerçekleşir.                                                                                             |
| <b>Karbon Ayak İzi</b>        | %50–80 daha düşük CO <sub>2</sub> salımı. Endüstriyel yan ürünlerin değerlendirildiği çevreci bir süreç sunar. 1 ton geopolimer bağlayıcı için $\approx 0,20$ – $0,40$ ton CO <sub>2</sub> salınımı | Küresel CO <sub>2</sub> emisyonlarının %6–8'i çimento üretiminden gelir. 1 ton portland çimentosu bağlayıcı için $\approx 0,85$ ton CO <sub>2</sub> salınımı |
| <b>Nihai Ürün Özellikler</b>  | Asit direnci yüksek, düşük geçirgenlik, yüksek dayanım ve iyi durabilite.                                                                                                                           | Standart dayanım ve dayanıklılık; kimyasal etkilere karşı görece daha düşük direnç.                                                                          |
| <b>Maliyet</b>                | Aktivatör maliyetine bağlı olarak yerel şartlara göre değişken; atık malzeme kullanımında ekonomik olabilir.                                                                                        | Çimento fiyatına bağlı olarak genelde daha stabil maliyetlidir.                                                                                              |

Geopolimer beton üretimi, geleneksel beton üretiminden farklı olarak klinkerleşme gerektirmediğinden enerji tüketimi %40–80 oranında daha düşüktür (Turner & Collins, 2013; Davidovits, 1991; Provis ve van Deventer, 2014; Hardjito vd., 2004; Mehta ve Monteiro, 2006; Duxon vd., 2007; Kim, 2016, Korkmaz, 2024).

Beton bileşimi ile geopolimer bileşimi karşılaştırıldığında özellikle bağlayıcı malzeme kullanımında farklılıklar görülmektedir. Beton bileşiminin ana maddesi çimento iken; geopolimer bileşiminin ana maddeleri alkali alüminosilikat kaynakları ve alkali aktivatördür. Şekil 4' de geleneksel beton ve geopolimer beton üretimine ilişkin üretim şeması bulunmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4. Beton Üretimi (a), Geopolimer Üretimi (b) (ClimateScience, 2025; Singh ve Middendorf, 2020)

Şekil 4 incelendiğinde beton bileşiminin %60-75 oranında kum, mıcır ve çakıldan oluştuğu görülmektedir. Çimento hamuru ise çimento (%7-15) ve sudan (%14-21) oluşmaktadır. Geopolimer üretiminde ise silis dumanı, kil, metakaolin, pirinç kabuğu külü, kırmızı çamur, cüruf ve uçucu kül gibi alümina silikat kaynakları kum ve agregat ile geopolimer betonun iskeletini oluşturur. Alkali kaynakları olan hidroksit ve silikat içeren alkali aktivatör ile karıştırıldıklarında geopolimer beton elde edilir.

Geopolimer beton üretiminde çimento üretiminde olduğu gibi uçucu kül ve cüruf gibi yan ürünlerin bağlayıcı bileşeni olarak değerlendirilmesi mümkündür. Her iki üretim yöntemi de atık yönetimi açısından avantaj sağlamaktadır. Geopolimer beton üretiminde karbon emisyonu daha düşük olduğundan sürdürülebilir yapı malzemeleri kapsamında önemli bir alternatif üretim yöntemi olarak değerlendirilir.

## 5. TAZE BETON ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Geopolimer betonun taze haldeki reolojik özellikleri, kullanılan aktivatör tipi, aktivatör konsantrasyonu ve hammadde yapısı nedeniyle geleneksel betondan farklılık gösterebilmektedir. İşlenebilirliğin sağlanması için karışım tasarımı önemli bir rol oynar. Geleneksel beton, kimyasal katkılarla geniş ölçüde uyumlu olduğu için işlenebilirlik kontrolü daha kolaydır. Geopolimer betonlarda priz süreleri;

- sıcaklık koşullarına ve
- aktivatör dozajına bağlı olarak değişmektedir.

Geopolimer betonlarda bazı durumlarda hızlı priz oluşabilmektedir. Kontrollü üretim koşullarında bu durum giderilse de saha uygulamalarında dikkat gerektirir. Tablo 3’ de geopolimer beton ile geleneksel betonun taze haldeki özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Tablo 3. Geopolimer Beton – Geleneksel Beton Karşılaştırma Tablosu (Taze Beton Koşulu)**

| Özellik                                     | Geopolimer Beton                                                          | Geleneksel Beton            |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Karışım Sıcaklığı</b>                    | 23–35°C (Aktivatör nedeniyle genelde daha yüksek)                         | 20–25°C                     |
| <b>Kıvam / Çökme (Slump)</b>                | 50–250 mm (Aktivatör oranı ve kimyasal katkıya bağlı olarak çok değişken) | 60–180 mm                   |
| <b>İşlenebilirlik</b>                       | Orta – Yüksek (Ancak işlenebilirlik süresi daha kısa olabilir)            | Orta – Yüksek               |
| <b>Priz Başlama Süresi</b>                  | 20–60 dakika (aktivatör molaritesine bağlı, hızlı olabilir)               | 1–3 saat                    |
| <b>Priz Bitiş Süresi</b>                    | 60–120 dakika                                                             | 3–6 saat                    |
| <b>Taze Beton Yoğunluğu</b>                 | 2200–2400 kg/m <sup>3</sup>                                               | 2300–2400 kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Ayrışma (Segregasyon)</b>                | Düşük – Orta                                                              | Düşük                       |
| <b>Terleme (Bleeding)</b>                   | Çok düşük (neredeyse yok)                                                 | Düşük – Orta                |
| <b>Hidratasyon Isısı (Isı Açığa Çıkışı)</b> | Düşük – Çok düşük (hidratasyon değil, polimerizasyon gerçekleşir)         | Yüksek                      |
| <b>Bazik Koku / Kimyasal Hassasiyet</b>     | Mevcut (Aktivatör nedeniyle)                                              | Yok                         |
| <b>Kalıp Reaksiyonu / Yapışma</b>           | Düşük                                                                     | Orta                        |

Tablo 3 incelendiğinde alkali çözeltilerin karışım sıcaklığını artırdığı görülmektedir. Geopolimer betonların kıvamları geleneksel betonlara göre daha akıcı olabilmektedir. İşlenebilirlik ise geopolimer betonda daha kısa süreli iken geleneksel betonda daha makul bir işlenebilirlik imkânı bulunmaktadır. Geopolimer betonlarda erken priz alma daha yaygındır. Özellikle geopolimer betona ısı kürü uygulandığında 60 dakika gibi bir sürede priz süresi bitişi elde edilebilir. Ayrışma geopolimer betonlarda daha az görülür. Bu da büyük hacimli beton dökümünde önemli bir avantaj sağlayabilir. Geopolimer beton aktivatör nedeniyle bazik bir kokuya sahipken geleneksel beton genelde kokusuzdur (Hardjito vd., 2004; Duxson vd., 2007; Rangan, 2008; Provis ve van Deventer, 2014; Bernal vd., 2012; Mehta ve Monteiro, 2006; Lakho ve Zardari, 2016).

## 6. SERTLEŞMİŞ BETON ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

### 6.1. Mekanik Özellikler

Geopolimer beton, basınç dayanımı açısından geleneksel betona eşdeğer veya daha üstün değerler sağlayabilmektedir. Özellikle cüruf esaslı geopolimerlerde yüksek erken yaş dayanımı gözlenmektedir. Elastisite modülü ise genellikle geleneksel betonla benzer veya bir miktar daha düşük olabilmektedir. Çekme ve eğilme dayanımları karışım tasarımına bağlı olarak değişse de, polimerik bağ yapısı nedeniyle daha sünek kırılma davranışı gösterebilmektedir.

Literatür, geopolimer betonun basınç dayanımlarının 40–90 MPa aralığında, bazı özel karışımlarda ise 120 MPa üzerinde değerlere ulaşabildiğini göstermektedir (Hardjito ve Rangan, 2005). Bu dayanımlar geleneksel betonla kıyaslandığında eşdeğer veya daha üstün seviyededir. Elastisite modülü ise genellikle Portland betonuna yakın değerlerdedir, ancak düşük Ca içeriği nedeniyle bazı karışımlarda daha düşük gözlenebilir.



Şekil 5. Geleneksel Beton ve Geopolimer Betona Genel Bakış

Geopolimer beton genel anlamda geleneksel betona göre daha çevreci ve dayanıklıdır. Geopolimer betonun hammaddelerinin tamamen atık malzemeden oluşması sürdürülebilirlik açısından geleneksel betondan daha iyi bir üretim yöntemi olduğunu göstermektedir.

Mekanik özellikler bakımından geopolimer beton 40-120 MPa basınç dayanımlarına ulaşabilirken; geleneksel betonlar genelde 20-80 MPa aralığında bir basınç dayanımı değeri alırlar.

Geopolimer beton dayanıklılık açısından belirgin üstünlüğe sahiptir. Sülfat, klorür ve asidik ortamlara karşı direnci geleneksel betona göre çok daha yüksektir.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  içermemesi nedeniyle kimyasal saldırılara karşı dayanıklıdır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda (600–800°C) geleneksel betona kıyasla daha az dayanım kaybı gösterir. Donma–çözülme dayanımı ise karışım tasarımına bağlı olarak değişmekle birlikte genel olarak iyileştirilmiş performans sergiler.

Geopolimer betonun en üstün yönü dayanıklılık performansıdır. Genel olarak asit saldırısına dayanım, sülfat dayanımı, klorür penetrasyonu ve yüksek sıcaklık dayanımı olarak ifade edilebilir. Bunlar;

- **Asit saldırısına dayanım:** Portland betonuna göre 5–10 kat daha az kütle kaybı bildirilmektedir (Bakharev, 2005).
- **Sülfat dayanımı:** Portland çimentosundaki etrenjit genişlemesi gerçekleşmediği için çok daha yüksek koruma sağlar.
- **Klorür penetrasyonu:** Geopolimer betonların difüzyon katsayısı %40–60 daha düşüktür (Fernández-Jiménez ve Palomo, 2009).
- **Yüksek sıcaklık dayanımı:** 800°C üzerindeki sıcaklıklarda Portland betonuna kıyasla daha düşük dayanım kaybı görülür biçiminde açıklanabilir.

## 7. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ve ÇEVRESEL ETKİLER

Geopolimer betonun en önemli avantajı düşük karbon ayak izidir. Portland çimento üretiminin aksine yüksek sıcaklıklı bir klinkerleşme süreci gerektirmediği için  $\text{CO}_2$  emisyonu büyük ölçüde azalır. Ayrıca uçucu kül ve cüruf gibi yan ürünlerin değerlendirilmesi, çevresel atık yükünün azaltılmasına katkı sağlar. Yaşam döngüsü analizleri, geopolimer betonun enerji tüketimi ve çevresel etkiler bakımından geleneksel betona kıyasla daha avantajlı olduğunu göstermektedir (Qu vd., 2024; Korkmaz, 2024; Korkmaz ve Ekincioğlu, 2024).

## 8. UYGULAMA ALANLARI ve PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Geopolimer beton; prefabrik eleman üretimi, altyapı projeleri, yol kaplamaları, yangına dayanıklı yapılarda kaplama ve taşıyıcı elemanlar gibi birçok alanda kullanılmaya başlamıştır. Bununla birlikte saha koşullarında alkali aktivatörlerle çalışmanın bazı zorlukları bulunmakta ve uygulama

deneyimi sınırlı bölgelerde tercih edilmesi kısıtlanabilmektedir. Geleneksel beton ise yaygın üretim altyapısı sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak uzun vadeli dayanıklılık gerektiren kimyasal zorlanmalı ortamlarda geopolimer betonun performansı belirgin şekilde daha üstündür.

## 9. STANDARTLAR ve MEVCUT DURUMUN DEĞERLENDİRİLMESİ

Geopolimer beton henüz birçok ülkede geleneksel beton kadar kapsamlı standartlara sahip değildir. ASTM, geopolimer ve alkali aktivasyonlu bağlayıcılara yönelik bazı düzenlemeler geliştirmeye başlamış olsa da, Portland çimentoyla eşdeğer yaygınlığa sahip değildir. Tablo 4’ de Geopolimer beton ve geleneksel beton standartları karşılaştırması verilmiştir.

**Tablo 4. Geopolimer Beton – Geleneksel Beton Standart Karşılaştırması**

| Alan                       | Geopolimer Beton                                                                                                                   | Geleneksel Beton                                                                                        |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Üretim Standartları</b> | Henüz tüm dünyada tamamen standardize değil; genellikle ASTM C618, ASTM C989, “alkali-activated materials” dokümanları kullanılır. | EN 197-1, TS EN 206, ASTM C150, ASTM C33, C494 net olarak tanımlanmıştır.                               |
| <b>Dayanım Sınıfları</b>   | TS/EN sınıflandırması yok; çoğu çalışma Basınç Dayanımı (compressive strength) olarak raporlar.                                    | C20/25 – C60/75 vb. tüm dayanım sınıfları tanımlıdır. TS 802-2016<br>Beton Karışım Hesabı standardıdır. |
| <b>Kür Koşulları</b>       | 40–80°C ısıtılabilir veya özel oda sıcaklığı formülasyonları.                                                                      | 20±2°C, %95 bağıl nem. Standartlaşmış.                                                                  |
| <b>Ekolojik Sertifika</b>  | Çok yüksek potansiyel – karbon ayak izi düşük                                                                                      | Orta seviye – çimento nedeniyle karbon yoğun.                                                           |

Geopolimer betonun henüz tam bir standardı bulunmadığı için Avrupa ve Avustralya’da pilot uygulamalarda kullanılmaktadır. Türkiye’de ise geopolimer beton için özel bir standart bulunmamakla birlikte, mevcut beton standartları rehberliğinde proje bazlı uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle geopolimer beton uygulamaları için halen araştırmacılar çalışmalarını sürdürmektedir (Turner & Collins, 2013; Davidovits, 1991; Provis ve van Deventer, 2014; Hardjito vd., 2004; Mehta ve Monteiro, 2006; Duxon vd., 2007; Kim, 2016, Korkmaz, 2024; Korkmaz ve Ekincioglu, 2024).

## 10. SONUÇ ve GENEL DEĞERLENDİRME

Geopolimer beton, mekanik ve dayanıklılık özellikleri, düşük karbon ayak izi ve endüstriyel atık değerlendirme potansiyeli ile sürdürülebilir yapı malzemeleri içinde önemli bir yere sahiptir. Geleneksel beton ise üretim altyapısı, maliyet etkinliği ve uygulama kolaylığı açısından halen avantajlıdır. Ancak çevresel kaygıların arttığı günümüzde, geopolimer betonun stratejik bir alternatif olarak değerlendirilmesi kaçınılmaz görünmektedir.

Gelecek yıllarda standartların gelişmesi ve üretim teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla geopolimer betonun yapı sektöründe daha geniş ölçekte kullanılması beklenmektedir. Bu sayede atıkların üretime kazandırılması, sürdürülebilir atık ve çevre yönetimi konularında önemli mesafeler alınabilecektir.

## KAYNAKLAR

- Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in acid and alkaline environments. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658–670.
- Bernal, S. A., De Gutiérrez, R. M., & Provis, J. L. (2012). Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. *Construction and Building Materials*, 33, 99–108.
- ClimateScience. (2025). İnşaat: Sürdürülebilir Çelik ve Çimento. <https://climatescience.org/tr/simple-construction> (E.T.: 04.09.2025).
- Çimsa. (2025). Hidratasyon Nedir? Çimento Hidratasyonu Nasıl Oluşur? <https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/hidratasyon-nedir-cimento-hidratasyonu-nasil-olusur/> (E.T.: 09.12.2025).
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656.
- Provis, J. L. (2018). Alkali-Activated Materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40–48.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., et al. (2007). “Geopolymer technology: The current state of the art.” *Journal of Materials Science*, 42, 2917–2933.
- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2009). Chemical Durability Of Geopolymers. In *Geopolymers* (pp. 167–193). Woodhead Publishing.
- Galván-Ruiz, M., Hernández, J., Baños, L., Noriega-Montes, J., & Rodríguez-García, M. E. (2009). Characterization Of Calcium Carbonate, Calcium Oxide, And Calcium Hydroxide As Starting Point To The Improvement Of Lime For Their Use In Construction. *Journal of Materials in civil Engineering*, 21(11), 694–698.
- García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2011). Compatibility studies between NASH and CASH gels. Study in the ternary diagram  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ . *Cement and Concrete Research*, 41(9), 923–931.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development And Properties Of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Curtin University Report*.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). On The Development Of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, 101(6), 467–472.
- Kim, Y. Y., et al. (2016). Mix Design Considerations For Alkali-Activated Materials. *Cement and Concrete Research*, 97, 61–72.
- Korkmaz, S. (2024). Hibrit Yüksek Fırın Cürufu Ve Toz Perlit Bağlayıcılı Hafif Geopolimer Kompozitlerde Manyetize Suyun Etkisi. *Kırıkkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Doktora Tezi*.
- Korkmaz, S., Ekincioglu, G. (2024). Geopolimerin İnşaat Sektöründeki Yeri ve Geleceği. İnşaat Mühendisliğinde İleri Araştırmalar, *Yaz Yayınları*, 227–244.
- Lakho, N. A., & Zardari, M. A. (2016). Relation Between Compressive Strength Of Baked Clay Cubes And Cylinders. *Engineering*, 8(8), 509–514.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). Concrete Microstructure, Properties, And Materials. *McGraw-hill*.
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, *RILEM TC 224-AAM*.
- Rangan, B. V. (2008). Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Curtin University Of Technology. *Research Report GC4*.
- Saeki, T., & Monteiro, P. J. (2005). A Model To Predict The Amount Of Calcium Hydroxide In Concrete Containing Mineral Admixtures. *Cement and concrete research*, 35(10), 1914–1921.
- Saeki, T., & Nagataki, S. (1997, June). Effect Of Hydration Of Cement After Initial Curing On Carbonation Rate. In *International Conference on Engineering Materials* (pp. 315–329).
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. (2018). Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers As An Alternative To Portland Cement: An Overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455.

- Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon Dioxide Equivalent (Co<sub>2</sub>-E) Emissions: A Comparison Between Geopolymer And Opc Cement Concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130.
- Türk Çimento (2021). Çimento ve Mineral Katkı Standartları, *Türk Çimento Yayınları*.
- Xu, H. (2002). “Geopolymerization of Aluminosilicate Minerals.” *PhD thesis*, University of Melbourne.
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y. (2009). Geopolymerization Process Of Alkali–Metakaolinite Characterized By Isothermal Calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493(1-2), 49-54.

# SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR YAPI MALZEMESİ OLARAK MAGNEZYUM OKSOSÜLFAT (MOSC) ÇİMENTOSU: KARAKTERİZASYON, MODİFİKASYON VE PERFORMANS

Şevki Eren<sup>1</sup>, Gökhan Ekincioglu<sup>2</sup>

## GİRİŞ

Modern inşaat endüstrisi, altyapı ve üstyapı taleplerini karşılamak için büyük ölçüde hidrolik bağlayıcılara bağımlıdır. Bu bağlayıcıların en yaygın olanı Portland çimentosu (OPC), dünyanın en çok tüketilen insan yapımı malzemesidir. Ancak, OPC üretimi, hem hammadde kaynaklı hem de enerji kaynaklı süreçler nedeniyle ciddi bir çevresel yük oluşturmaktadır. Walling ve Provis (2016), OPC klinker üretiminin, kireçtaşının ( $\text{CaCO}_3$ ) kalsinasyonu sırasında açığa çıkan karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) ve fırınların 1450 °C sıcaklığa ulaşması için harcanan fosil yakıt enerjisi nedeniyle, küresel insan kaynaklı  $\text{CO}_2$  emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumlu olduğunu belirtmektedir. Çimento endüstrisinin yarattığı bu çevresel yükler, araştırmacıları Portland çimentosuna kıyasla daha düşük üretim enerjisi gerektiren ve karbon ayak izi azaltılmış alternatif bağlayıcılar geliştirmeye yöneltmiştir. Bu alternatif arayışında, magnezyum oksit (MgO) esaslı çimentolar güçlü adaylar olarak öne çıkmaktadır.

Düşük üretim enerjisine ek olarak, magnezyum oksosülfat çimentoları (MOSC) bünyesindeki MgO ve  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  bileşenlerinin hidrasyon ve karbonatlaşma süreçlerinde atmosferik  $\text{CO}_2$ 'i bünyesine hapsederek stabil karbonatlar oluşturma yeteneği, bu malzemeyi 'karbon-negatif' potansiyele sahip çevreci bir bağlayıcı yapmaktadır (Li vd.,2024b; Gu, Chen ve Jiang, 2023).

MOSC çimentosu, tarihsel olarak bilinen magnezyum oksiklorür (MOC) çimentosunun sülfat analogu olup, MgO ile magnezyum sülfat çözeltisinin reaksiyonu ile elde edilen bir bağlayıcı türüdür (Shand, 2006). Bu reaksiyon sonucunda mekanik dayanıma en büyük katkıyı sağlayan "iğne yapılı" morfolojisiyle matrisi güçlendiren 5-1-7 fazı ( $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) oluşur (Li vd.,2024b; Gu, Chen ve Jiang, 2023). Bu çimento türü, MOC çimentoları ile benzer yüksek bağlayıcılık özelliklerine sahip olmakla birlikte, yapısında

1 Dr. Öğretim Üyesi 1Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, ORCID ID: 0000-0003-0773-403, e-mail: seren@ahievran.edu.tr

2 Doç. Dr. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman Meslek Yüksekokulu, ORCID ID: 0000-0001-9377-6817, e-mail: gekincioglu@ahievran.edu.tr

klorür bulundurmadağı için donatı korozyonu riskini ortadan kaldırmasıyla ayrışır. Endüstriyel uygulamalarda MOSC, özellikle hafif yalıtım panellerinin üretiminde yaygın bir kullanım alanı bulmuştur (Shand, 2006).

### **MOSC Çimentosunun OPC'ye Göre Avantaj ve Dezavantajları**

- Avantajları ve Güçlü Yönleri:

Çevresel Sürdürülebilirlik: MOSC üretiminde kullanılan  $MgO$ , 700-900 °C gibi düşük sıcaklıklarda kalsine edilirken, Portland klinkeri 1450 °C sıcaklık gerektirir (Li vd. 2024b). Bu durum, enerji tüketimini ve  $CO_2$  emisyonlarını %40-60 oranında azaltır (Hu, Guan ve Zhang, 2022). Ayrıca, hizmet ömrü boyunca havadaki  $CO_2$ 'i emerek karbonatlaşma yoluyla “karbon tutma” kapasitesine sahiptir (Li vd. 2024b).

Üstün Yangın ve Isı Yalıtımı: Yapısındaki kristal suyu sayesinde yanmazlık özelliğı çok yüksektir ve ısı iletkenliğı düşüktür (Li vd. 2024b). Bu özellik, onu hafif yalıtım panelleri için ideal kılar (Li vd. 2024b; Wu vd., 2018).

- Dezavantajları ve Zayıf Yönleri:

Coğrafi Rezerv Kısıtları: Portland çimentosunun hammaddesi olan kireçtaşı küresel olarak yaygın bulunurken, MOSC üretiminin ana kaynağı olan manyezit ( $MgCO_3$ ) rezervleri sınırlıdır ve coğrafi olarak dengesiz dağılmıştır. Örneğın, dünya manyezit rezervlerinin büyük bir kısmı Çin'in Liaoning eyaletinde yoğunlaşmıştır. Bu durum, hammaddeye erişimde lojistik maliyetleri artırmakta ve malzemenin küresel ölçekte yerel üretimini kısıtlayabilmektedir (Gu, Chen ve Jiang, 2023; Hay vd., 2021).

Hammadde Maliyeti: Saf manyezit madenciliğı ve işlenmesi, kireçtaşına (Portland hammaddesi) göre daha maliyetlidir. Ancak tuz gölü yan ürünlerinin kullanımı bu dezavantajı azaltabilir (Wu vd., 2018).

Suya Karşı Hassasiyet: Saf MOSC, suya maruz kaldığında ana dayanım fazı olan 5-1-7 fazı bozularak  $Mg(OH)_2$  (Brusit) ve  $MgSO_4$ 'e dönüşür. Bu durum ciddi dayanım kaybına yol açar (Li vd. 2024b; Wu vd., 2015).

Hacimsel Kararsızlık: Modifiye edilmemiş MOSC, hidratasyon sırasında kontrolsüz genleşme veya kuruma büzülmesi nedeniyle çatlama riski taşır (Zhao vd., 2024).

Söz konusu dezavantajların üstesinden gelmek ve MOSC sistemlerinin performansını artırmak amacıyla yürütölen çalışmalar günümüzde hız kazanmıştır. Bu geliştirme stratejilerinin tam olarak kavranabilmesi için, öncelikle MOSC sistemlerinin faz dengeleri, hidratasyon kinetiğı ve kristalleşme mekanizması gibi temel unsurlarının incelenmesi gerekmektedir.

## TEORİK ALTYAPI VE HİDRATASYON MEKANİZMASI

### MgO-MgSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O Üçlü Faz Sistemi ve Kristal Yapılar

MOSC çimentolarında, MgO-MgSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O üçlü sisteminde, sıcaklık ve molar oranlara bağlı olarak dört temel magnezyum hidroksit sülfat hidrat fazı oluşabilmektedir (Wu vd., 2015, 2019; Wu ve Huang, 2024; Li vd., 2024b).

1. 5-1-7 Fazı (5Mg(OH)<sub>2</sub>.MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O): MOSC sisteminin mekanik dayanımını sağlayan en önemli fazdır. SEM analizleri, bu fazın iğne benzeri (needle-like) veya bıyık (whisker-like) morfolojiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu iğne yapıları kristaller, matris içerisinde birbirine kenetlenerek (interlocking) yoğun bir ağ yapısı oluşturur ve bu mikroyapı, malzemenin yüksek basınç ve eğilme dayanımının temel kaynağıdır (Wu vd., 2015; Wu ve Huang, 2024; Li vd., 2024b).
2. 3-1-8 Fazı (3Mg(OH)<sub>2</sub>.MgSO<sub>4</sub>.8H<sub>2</sub>O): Genellikle oda sıcaklığında oluşan ancak mekanik özellikleri 5-1-7 fazına göre daha zayıf olan bir fazdır. Literatürde bu fazın metastabil (yarı kararlı) olduğu ve zamanla dönüşebileceği belirtilmiştir (Wu vd., 2019; Li vd., 2024b).
3. Diğer Fazlar: Yüksek sıcaklıklarda veya farklı stokiometrik oranlarda 5-1-3 fazı (5Mg(OH)<sub>2</sub>.MgSO<sub>4</sub>.3H<sub>2</sub>O) ve 1-1-5 fazı (Mg(OH)<sub>2</sub>.MgSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O) gibi yapılar da gözlemlenebilmektedir (Wu vd., 2019; Li vd., 2024b).
4. Brusit (Mg(OH)<sub>2</sub>): İstenmeyen bir yan üründür. Levhamsı (flake-like) ve gevşek bir yapıya sahiptir. Matris içinde brusit oluşumu, 5-1-7 fazının oluşumunu engelleyerek mekanik dayanımın düşmesine neden olur (Wu vd., 2015; Wu ve Huang, 2024; Li vd., 2024b).

Shand (2006), bu fazlar arasında sadece 3-form ve 5-formun oda sıcaklığında (25°C) termodinamik olarak kararlı olduğunu, ancak endüstriyel uygulamalarda üstün mekanik özellikleri nedeniyle 5-1-7 fazının hedeflendiğini belirtmektedir.

### Hidratasyon Reaksiyonu ve Kristalleşme Mekanizması

MOSC'nin hidratasyonu, basit bir su katılımı değil, aşamalı bir çözünme-çökme ve kristalleşme sürecidir. Wu vd. (2015, 2019), bu süreci detaylı olarak incelemiş ve şu mekanizmayı ortaya koymuştur:

Çözünme: Aktif MgO, su ile temas ettiğinde yüzeyden çözünerek Mg<sup>2+</sup> ve OH<sup>-</sup> iyonlarını serbest bırakır. Eş zamanlı olarak MgSO<sub>4</sub> tuzu da çözünerek Mg<sup>2+</sup> ve SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iyonlarını verir (Wu vd., 2015; Wu ve Huang, 2024).

1. Kompleks Oluşumu: Çözelti ortamında hidrate olmuş magnezyum iyonları, [Mg(OH)(H<sub>2</sub>O)<sub>x</sub>]<sup>+</sup> şeklinde pozitif yüklü kompleks iyonlar oluşturur (Wu vd., 2015; Wu ve Huang, 2024).

**Çökme ve Kristalleşme (Katkısız Durumda):** Ortamda düzenleyici bir etki yoksa, bu kompleksler hızla  $\text{OH}^-$  iyonları ile reaksiyona girerek çözünürlüğü düşük olan  $(\text{Mg}(\text{OH})_2)_x$  fazını oluşturma eğilimindedir. Reaksiyon şu şekildedir:



Bu durum, bağlayıcılığı zayıf bir yapıya yol açar (Wu vd., 2015; Wu ve Huang, 2024; Li vd., 2024b).

**Çökme ve Kristalleşme (Katkılı Durumda):** Sitrik asit, fosforik asit veya 5-1-7 tohum kristalleri (seed crystals) kullanıldığında mekanizma değişir. Modifiye edici anyonlar (örneğin sitrat veya fosfat iyonları),  $[\text{Mg}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_x]^+$  komplekslerinin yüzeyine adsorbe olarak  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  oluşumunu engeller (inhibisyon). Bu süreç, ortamdaki  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonlarının yapıya girmesine ve 5-1-7 fazının çekirdeklenmesine olanak tanır. İdeal reaksiyon şu şekilde özetlenebilir: (Wu vd., 2015; Wu ve Huang, 2024).



### HAMMADELER VE KARIŞIM OPTİMİZASYONU

MOSC çimentosunun mühendislik performansı, hidrasyon kimyasının ötesinde, kullanılan hammaddelerin fizikokimyasal özelliklerine ve karışım tasarımındaki hassas stokiyometrik oranlara bağlıdır. Literatürdeki güncel çalışmalar, reaktif MgO kaynağının, molar oranların ve sisteme entegre edilen kimyasal/mineral katkıların, malzemenin mikroyapısını ve nihai dayanımını büyük oranda değiştirdiğini göstermektedir.

#### MgO Kaynağı ve Kalsinasyon Parametreleri

MOSC üretiminin temel bileşeni olan Hafif Yakılmış Magnezya (LBM), manyezit cevherinin kontrollü kalsinasyonu ile elde edilir. Zhou vd. (2024), kalsinasyon sıcaklığının MgO kristal yapısındaki kafes bozulmaları (lattice distortion) ve reaktivite üzerindeki etkisini detaylıca incelemiş; en yüksek reaktiviteye (en kısa sitrik asit nötralizasyon süresi)  $700^\circ\text{C}$  sıcaklıkta ulaşıldığını, sıcaklık arttıkça (özellikle  $800^\circ\text{C}$  ve üzeri) reaktivitenin düştüğünü rapor etmiştir.

Düşük sıcaklıklarda yapılan işlem, manyezitin tam ayrışmasını sağlarken kristallerin sinterleşmesini engeller ve yüksek spesifik yüzey alanı sağlar. Buna karşılık, Shand (2006) ve Sun vd. (2024),  $1000^\circ\text{C}$  ve üzerindeki sıcaklıklarda MgO kristallerinin sinterleşerek reaktivitesini büyük ölçüde kaybettiğini (hard-burned veya dead-burned benzeri davranış), bunun da hidrasyon reaksiyonunu yavaşlatarak erken yaş dayanımını düşürdüğünü belirtmektedir. Ayrıca, Wu vd. (2018), tuz gölü yan ürünlerinden (magnezyum cürufu) elde edilen MgO'nun da ekonomik bir alternatif olabileceğini, ancak kalsinasyon rejiminin saf manyezite göre optimize edilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Kalsinasyon sürecinin verimliliği, elde edilen ürünlerdeki toplam magnezyum oksit miktarından ziyade, çimento reaksiyonlarına doğrudan katılabilen “Aktif MgO” ( $\alpha$ -MgO) yüzdesi ile ölçülür. LBM içerisindeki aktif MgO oranının belirlenmesinde, XRD ve TGA gibi daha karmaşık analizlere kıyasla pratikliği ve yüksek tekrarlanabilirliği nedeniyle “Standart Hidrasyon Yöntemi” tercih edilmektedir (Li ve Chen 2024a; Li vd., 2024b; Gu, Chen ve Cui, 2022; Gu, Chen ve Jiang, 2023; Tan vd., 2021b; Zhou ve Wu, 2020; Wang, Qin ve Gao, 2020; Wu vd., 2017; Liang, Guan ve Bi, 2022). Bu yöntemin detaylı prosedürü ve hesaplama esasları Chen vd. (2019) çalışmasında açıkça tanımlanmıştır. Yöntem, MgO numunesinin su ile tam reaksiyona girerek brusite dönüşmesi ve yapıya katılan kimyasal suyun kütsel artışı üzerinden aktiflik oranının hesaplanması prensibine dayanır. Chen vd. (2019) tarafından belirtilen prosedür şu adımları içerir:

**Hidrasyon:** Hassas terazi ile tartılan yaklaşık 2.0 g MgO tozu ( $W_0$ ), reaktif tanelerin su ile tam temasını sağlamak üzere 20 mL saf su ile karıştırılarak süspansiyon haline getirilir.

**Kürlleme:** Karışım, hidrasyon reaksiyonlarının tamamlanması amacıyla  $20 \pm 2$  °C sıcaklık ve  $\%65 \pm 5$  bağıl nem koşullarında 24 saat boyunca bekletilir.

**Kurutma ve Ölçüm:** Kürlenmiş numune, kimyasal olarak bağlanmış suyu ( $Mg(OH)_2$ ) koruyarak sadece serbest suyu uzaklaştırmak için etüvde (genellikle 105 °C’de) kurutulur ve sabit ağırlığa ulaştığında son tartım ( $W_1$ ) yapılır.

Elde edilen verilerle Aktif MgO yüzdesi, Eşitlik 1 ile hesaplanır: (Chen vd., 2018; Chen vd., 2019; Wu vd., 2017)

$$\text{Aktif MgO (\%)} = \frac{(W_1 - W_0)}{0,45W_0} \times 100 \quad (1)$$

Eşitlikte; ( $W_1 - W_0$ ) hidrasyon sonucu kazanılan su kütsesini ifade ederken; 0.45 katsayısı, suyun ( $H_2O$ ) moleküler ağırlığının magnezyum oksidin (MgO) moleküler ağırlığına oranını ( $\approx 18/40.3$ ) temsil etmektedir.

### MgO Reaktivitesi

MOSC çimentolarının priz süresi ve nihai dayanımı, kullanılan MgO’nun reaktivitesine ve eklenen modifikatörlerin türüne göre geniş bir aralıkta değişebilir. Sun vd. (2024), yüksek reaktiviteye sahip ( $\%88$ ) MgO tozlarının, düşük reaktiviteli olanlara kıyasla priz süresini yüksek oranda kısalttığını rapor etmiştir. Çalışmalarında, yüksek reaktiviteli MgO ve magnezyum sülfatın bilyalı öğütme (ball milling) ile ön işleme tabi tutulmasıyla, hidrasyonun kontrol altına alındığı ve malzemenin yaklaşık 1 saat (55-70 dk) içinde priz alabildiği belirlenmiştir. Bu yöntemle üretilen çimentonun 3. gün basınç dayanımının, geleneksel yöntemle hazırlanan numunelere kıyasla dört kata varan oranda arttığı tespit edilmiştir.

MgO'nun MOSC sistemlerindeki performansını belirleyen reaktivite seviyesinin tespiti için endüstride asit nötralizasyon testleri standart olarak kabul edilmektedir. Bu testlerde temel prensip, MgO'nun zayıf bir asidi nötrale etme süresinin (saniye) ölçülmesidir. Shand (2006), bu amaçla kullanılan 'Kostik Magnezya Aktivite Testi'nde (Caustic Magnesia Activity Test) asetik asit yöntemini detaylandırmıştır. Bu yöntemde, 5.0 gram MgO numunesi, saf su ve fenolftalein indikatörü içeren bir süspansiyona eklenir ve üzerine belirli derişimde (genellikle 1.0 N) asetik asit ilave edilir. MgO'nun reaktivite derecesi, asidin eklenmesinden itibaren çözeltinin nötrale olarak fenolftalein etkisiyle kırmızı/pembe renge dönmesine kadar geçen süre (saniye cinsinden) olarak tanımlanır. Sürenin kısalığı, MgO'nun asidi daha hızlı nötrale ettiğini, dolayısıyla reaktivitesinin (ve özgül yüzey alanının) yüksek olduğunu gösterir. Literatürde Dung ve Unluer (2018) ile Hay vd. (2021) gibi araştırmacılar da, kullandıkları magnezyum çimentolarının karakterizasyonunda Shand (2006) tarafından belirtilen bu yöntemi referans alarak, asit nötralizasyon süresini reaktivitenin temel göstergesi olarak kullanmışlardır.

Buna paralel olarak Van der Merwe, Strydom ve Botha (2004), endüstride sitrik asit yönteminin de yaygın olarak kullanıldığını belirtmiş ve reaktivite sürelerine göre bir sınıflandırma sunmuştur. Buna göre endüstriyel uygulamalarda; nötralizasyon süresi genellikle 60 saniyeden kısa olan MgO'lar "yüksek reaktif", 180-300 saniye aralığındakiler "orta reaktif" ve 600 saniyeden uzun olanlar ise "düşük reaktif" olarak sınıflandırılmaktadır.

Endüstriyel standartlar (asetik/sitrik asit testleri) pratik bir sınıflandırma sağlasa da, akademik araştırmalarda reaksiyon kinetiğini daha detaylı analiz etmek amacıyla pH izleme yöntemi tercih edilmektedir. Örneğin, Matabola vd. (2010), asetik asit gibi asidik ajanların varlığında  $H^+$  iyon konsantrasyonunun artmasıyla MgO çözünürlüğünün arttığını ve bunun da hidratasyon derecesini iyileştirdiğini pH profilleri üzerinden göstermiştir. Bu yöntem, sadece nötralizasyonun tamamlanma anını değil, çözünme kinetiğinin tüm aşamalarını ortaya koyması bakımından tekil bir süre ölçümüne göre daha kapsamlı veri sunmaktadır.

### **Molar Oranlar ve Stokiyometri**

MOSC'nin faz oluşumu (5.1.7 fazı),  $MgO/MgSO_4$  ve  $H_2O/MgSO_4$  molar oranlarına doğrudan bağlıdır. Li vd. (2024b), çalışmalarında molar oranı  $\alpha-MgO:MgSO_4:H_2O = 9:1:16$  olarak sabitleyerek, bu oranın aşırı su kullanımını engellediğini ve yoğun bir matris oluşumunu desteklediğini göstermiştir.

Zhao vd. (2024) ise molar oranların sadece dayanımı değil, gözenek yapısını da etkilediğini belirterek, optimum oranın (genellikle 7-10 arası  $MgO/MgSO_4$ ) dışına çıkıldığında matris içinde reaksiyona girmemiş brusit miktarının arttığını ve bunun da su direncini düşürdüğünü ifade etmiştir. Literatür incelendiğinde,

MgO/MgSO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O molar oranı için Chen vd. (2022) 8.5/1/20 oranını tercih ederken; Tan vd. (2021b) ve Liang, Guan ve Bi (2022) 8/1/20 oranını kullanmışlardır.

### **Kimyasal Modifikasyon**

MOSC sistemlerinde kimyasal katkılar, sadece priz süresini ayarlamakla kalmaz, aynı zamanda hidrasyon ürünlerinin kristal morfolojisini değiştirerek malzemenin su direncini ve mekanik performansını doğrudan belirler. Literatürde öne çıkan organik ve inorganik modifikatörlerin etki mekanizmaları aşağıda özetlenmiştir:

**Sitrik Asit ve Sinerjik Modifikasyon:** Sitrik asit (CA), MgO yüzeyine adsorbe olarak hidrasyonu geciktirici bir etki gösterse de, doğru kombinasyonlarla üstün performans sağlar. Wang vd. (2024), CA'nın sodyum aljinat (SA) ile birlikte kullanıldığında (%1.2 CA + %0.4 SA) sinerjik bir etki yarattığını ortaya koymuştur. Bu ikili sistemde, 28 günlük basınç dayanımı 83.71 MPa değerine ulaşmaktadır. CA, 5-1-7 fazının oluşumunu desteklerken, SA'nın Mg<sup>2+</sup> iyonları ile reaksiyona girerek oluşturduğu çapraz bağlı ağ yapısı (cross-linked network structure), 5-1-7 kristallerini sarmalayarak (wrapping) su moleküllerinin yapıya nüfuz etmesini fiziksel olarak engellemekte ve su direncini maksimize etmektedir. Bu kombinasyon (1.2% CA + 0.4% SA), suda bekletilen numunelerin yumuşama katsayısını 0.89'a kadar yükseltmiştir.

**Tartarik Asit ve Kristal Yönlendirme:** Wu vd. (2017), tartarik asidin (TA) magnezyum iyonları ile kompleks oluşturarak MgO partikülleri üzerinde geçici bir koruyucu film tabakası meydana getirdiğini belirlemiştir. Bu mekanizma, istenmeyen brisit oluşumunu baskımlarken, iğne yapılı 5-1-7 fazının (5Mg(OH)<sub>2</sub>·MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) çekirdeklenmesini ve büyümesini teşvik eder. Çalışmalar, %1.0 TA ilavesinin sadece priz süresini uzatmakla kalmayıp, aynı zamanda 5-1-7 kristallerinin boyutlarını büyütürken matrisin çatlak direncini artırdığını göstermektedir.

**Fosforik Asit ve Fosfatlar:** İnorganik asitler arasında fosforik asit (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) ve tuzları, sitratlara kıyasla daha farklı bir modifikasyon mekanizması sunar. Wu vd. (2015), fosfat kaynaklarının etkinliğini  $H_3PO_4 \approx KH_2PO_4 \gg K_2HPO_4 > K_3PO_4$  şeklinde sıralamıştır. Çözeltide oluşan H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> anyonları, [Mg(OH)(H<sub>2</sub>O)<sub>x</sub>]<sup>+</sup> komplekslerine adsorbe olarak brisit oluşumunu engeller. Zhang vd. (2023), fosforik asit (PA) ile kalsiyum sitratı (CC) karşılaştırdıkları çalışmalarında, PA'nın 5-1-7 fazı kristallerini kabalaştırarak (coarsening) su direncini daha etkili bir şekilde artırdığını belirlemiştir. Çalışmada, PA katkılı numunelerin yumuşama katsayısının 0.94 seviyesine kadar ulaştığı rapor edilmiştir.

**Borik Asit ve Isı Kontrolü:** Hızlı priz alan ve düşük karbonlu MOSC çimentoları için borik asit (BA) kritik bir bileşendir. Chen vd. (2022), %1.0 BA ilavesinin hidrasyon ısını düşürerek termal çatlak riskini azalttığını ve 28

günlük basınç dayanımını 91.4 MPa seviyesine çıkardığını belirtmiştir. Ancak, Zhang, Zhang ve Wu (2022), hammaddeden gelen kontrolsüz bor safsızlığının (%3-5 gibi) hidratasyonu aşırı geciktirerek erken yaş dayanımını düşürebileceği konusunda uyarıda bulunmaktadır.

**Silisik Asit ve Priz Süresi:** Priz süresini kısaltmak için Zhang vd. (2024), silisik asit kullanımını önermiştir. Silisik asit, CA içeren (gecikmiş) MOSC sistemlerinde  $Mg^{2+}$  iyonları ile reaksiyona girerek magnezyum silikat hidrat (M-S-H) jeli oluşturmakta ve bu sayede priz başlangıç süresini yaklaşık 2 ila 4 saat kadar kısaltabilmektedir. Öte yandan, priz süresini ve performansı optimize etmek için Zhou vd. (2023), CA ve sodyum hekzametafosfat (SHPP) kombinasyonunu önermiştir. Bu ikili (MOS-CHP), tek başına kullanıma göre daha üstün bir sinerji yaratarak hem priz süresini uzatmış hem de 28 günlük basınç dayanımını %112.8 oranında artırmıştır.

**Yeni nesil asit modifikasyonları:** Qiao vd. (2025), yeni nesil fosfonobütan trikarboksilik asit (PBTC) ve hidrolize polimaleik anhidrit (HPMA) asit modifikasyonlarının, 5-1-7 fazı kristallerinin oluşumunu teşvik ederek iğne-çubuk (needle-and-rod) yapıyı yoğun bir ağ oluşturduğunu ve bu sayede 28 günlük basınç dayanımını kontrol grubuna göre %127.45 oranında artırdığını rapor etmiştir.

### **Mineral Katkılar**

Sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği hedefleri doğrultusunda, endüstriyel yan ürünlerin MOSC matrisine entegrasyonu, malzemenin hem durabilitesini hem de çevresel profilini iyileştirmektedir.

**Silis Dumanı (Silica Fume - SF) ve Termal Direnç:** Silis dumanı, MOSC sisteminde sadece fiziksel bir dolgu maddesi değil, aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda aktifleşen kimyasal bir bileşendir. Li vd. (2024b), silis dumanı (SF) ikamesinin MOSC'nin oda sıcaklığındaki (20 °C) mekanik özelliklerine etkisini incelemiş ve SF oranının %15'e çıkarılmasıyla basınç dayanımının referans numuneye kıyasla 61.5 MPa'dan 67.7 MPa'ya yükseldiğini rapor etmiştir. Çalışma, bu mukavemet artışını, SF partiküllerinin matris içerisindeki boşlukları doldurma etkisi (filler effect) ve istenmeyen  $Mg(OH)_2$  oluşumunu engelleyerek, dayanımı sağlayan 5-1-7 fazının kristalleşmesini teşvik etmesi ile ilişkilendirmiştir. Ayrıca, Tan vd. (2021b) ve Zhou ve Wu (2020), SF'nin ultra ince yapısıyla mikroporları doldurarak su moleküllerinin 5-1-7 fazına erişimini zorlaştırdığını ve su direncini artırdığını doğrulamıştır.

**Fosfojips (Phosphogypsum - PG):** Fosforik asit üretiminin yan ürünü olan fosfojips, MOSC harçlarında kum yerine kullanılabilecek potansiyel bir agregadır. Li ve Chen (2024a), %10 PG ikamesinin, MOSC'un 28 günlük basınç dayanımını 68.2 MPa'ya çıkardığını rapor etmiştir. PG, malzemenin su direncini artırırken (yumuşama katsayısını 0.83'e yükselterek), içeriğindeki

çözünür fosfatlar nedeniyle priz süresini uzatmakta ve yoğunluğu düşürerek hafif yapı elemanları üretimine olanak tanımaktadır.

**Cüruf ve Uçucu Kül:** Zhao vd. (2024), uçucu kül (FA) ve cüruf (GGBS) gibi endüstriyel atıkların MOSC matrisine dahil edilmesinin, mikro-agrega etkisiyle gözenek yapısını iyileştirdiğini rapor etmiştir. Bu fiziksel dolgu etkisi, zararlı gözeneklerin oranını azaltarak suyun yapıya işlemlerini zorlaştırır. Çalışmada, sitrik asit modifiyeli kontrol grubunun yumuşama katsayısı 0.89 iken, %15 oranında mineral katkı ilavesiyle bu değerin 0.92-0.95 aralığına kadar yükseldiği ve su direncinin belirgin şekilde arttığı tespit edilmiştir. Yazarlar, aynı zamanda FA ve GGBS birlikte kullanımının (%45 toplam ikame, 2:1 FA:GGBS oranı), 71.8 MPa gibi yüksek bir basınç dayanımı sağladığını belirlemiştir. Zhu vd. (2024) ise cüruf kullanımının, MOSC bazlı işlenmiş çimentolu kompozitlerin (ECC) üretim maliyetini düşürürken karbon ayak izini azalttığını vurgulamıştır.

**Köpük ve Pirinç Kabuğu:** Wang, Qin ve Gao (2020), pirinç kabuğu (rice husk) ve köpük ajanı kullanılarak üretilen hafif MOSC malzemelerini incelemiştir. Çalışmada, 0.8 g/cm<sup>3</sup> (800 kg/m<sup>3</sup>) kadar düşük yoğunlukta 10 MPa civarında 28 günlük basınç dayanımı elde edilirken, 1.27 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta bu değer 43.8 MPa'ya kadar ulaşmıştır. Bu malzemeler, iç duvar bölmeleri ve yalıtım elemanları için uygun adaylardır.

## YÜKSEK SICAKLIK VE YANGIN DİRENCİ

MOSC, geleneksel yapı malzemelerine kıyasla üstün yangın direnci ile bilinir. Ancak yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, faz dönüşümleri ve mikroyapısal bozulmalar meydana gelir. Literatürdeki güncel çalışmalar, bu mekanizmaları ve farklı kompozitlerin ısıl performansını detaylandırmaktadır.

**Termal Bozunma Mekanizması ve Faz Dönüşümleri:** Gu, Chen ve Cui (2022), MOSC çimentosunun termal stabilitesinin temel olarak 5-1-7 fazının ve brüstün bozunma davranışına bağlı olduğunu belirlemiştir. Çalışma, 100 °C ile 900 °C arasındaki değişimleri incelemiş ve kritik sıcaklığın 600 °C olduğunu saptamıştır. 600 °C'nin üzerinde, 5-1-7 fazı tamamen bozunarak MgO ve susuz MgSO<sub>4</sub>'e dönüşmekte, bu da matrisin gevşemesine ve basınç dayanımında ani düşüşlere (%50'nin üzerinde kayıp) neden olmaktadır. Hu, Guan ve Zhang (2022) ise, 5-1-7 fazının termal aktivasyonunu inceledikleri çalışmalarında, orta sıcaklıklarda (150-450 °C) gerçekleşen dehidrasyonun, malzemenin kristal yapısını amorf bir "mezo-faz" yapıya dönüştürdüğünü ve bu yapının su ile tekrar karıştırıldığında yeniden sertleşme yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, yangın sonrası hasar gören MOSC yapılarının potansiyel onarımı veya geri dönüşümü için kritik bir veridir.

**Hasar Mekanizması:** Guo vd. (2021), MOSC betonlarının 100 °C ile 900 °C arasındaki davranışını incelemiş ve 500 °C sonrasında ultrasonik dalga hızında ciddi düşüşler olduğunu tespit etmiştir. Bu düşüş, 5-1-7 fazının dehidrasyonu

ve matrisin çatlamasıyla ilişkilendirilmiştir. Ancak malzeme 300 °C'ye kadar dayanımını büyük oranda korumuştur.

Agrega Türünün Yüksek Sıcaklık Performansına Etkisi: Farklı agregalar, MOSC'un termal şok direncini değiştirebilir. Guo vd. (2025), mercan agregası kullanılarak üretilen MOSC betonlarının (BMSC-CAC), 100 °C ila 900 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki dinamik davranışlarını incelemiştir. Çalışma, 500 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda malzemenin, yüksek deformasyon hızlarında dinamik dayanımını koruduğunu, ancak daha yüksek sıcaklıklarda "sıcaklık zayıflaması" etkisinin baskın hale geldiğini göstermiştir.

Endüstriyel Atıkların Termal Dirence Katkısı: Gu, Chen ve Jiang (2023), fosfat atıkları ve fosfojips (PG) kullanılarak üretilen MOSC harçlarının yüksek sıcaklık direncini araştırmıştır. Çalışma, numunelerin 400 °C'ye kadar dayanım artışı gösterdiğini (133.8 MPa) ancak 600 °C'de  $Mg(OH)_2$  fazının bozunmasıyla oluşan gözenekli yapı nedeniyle ciddi mukavemet kaybı yaşandığını rapor etmiştir. Ayrıca, fosfojips ilavesinin priz süresini kısalttığı ancak yüksek sıcaklık sonrası kalıcı dayanıma kontrol grubuna kıyasla olumsuz etki ettiği belirlenmiştir. Xu vd. (2025), endüstriyel atık florojips (FG) ile hazırlanan MOSC'nin yüksek sıcaklık direncini araştırmıştır. %18 FG ikamesi, 400 °C'ye maruz kalan numunelerde bile yapının bütünlüğünü korumasına yardımcı olmuş ve artık dayanımı (residual strength) artırmıştır.

Mineral Katkı Etkisi: Li vd. (2024b), MOSC çimentosuna %5-15 oranında SF ikamesinin, malzemenin yüksek sıcaklık dayanımını önemli ölçüde artırdığını belirlemiştir. Çalışma, SF katkılı numunelerin 400°C'ye maruz kalması durumunda M-S-H jeli oluşumunun teşvik edildiğini; 800°C'de ise  $MgO$  ile silis kaynağı arasında gerçekleşen katı-katı reaksiyonu sonucu yüksek termal kararlılığa sahip forsterit ( $Mg_2SiO_4$ ) fazının meydana geldiğini ve bu sayede kalıcı mukavemetin korunduğunu rapor etmiştir.

Saman ve Lif Takviyeli Paneller: Zuo vd. (2018), silikon-akrilat emülsiyonu ile modifiye edilmiş saman/MOSC kompozitlerinin, organik-inorganik bir ağ yapısı oluşturarak hem su direncini hem de alev geciktirici özelliklerini artırdığını tespit etmiştir. Bu modifikasyon, yangın sırasında kompozitin bütünlüğünü korumasına yardımcı olmaktadır. Xiao vd. (2018), tarımsal atık olan pirinç samanı (rice straw) ve cam elyafı ile güçlendirilmiş MOSC kompozitlerini incelemiştir. Çalışma, silikon-akrilat emülsiyonu ile modifiye edilen bu kompozitlerin, %9 cam elyafı katkısı ile 18.3 MPa eğilme dayanımına (MOR) ulaştığını göstermiştir. Ayrıca bu paneller, mükemmel yangın geciktirici özellik sergilemiştir.

Hızlandırılmış Karbonatlaşma Etkisi: Hay vd. (2021), reaktif magnezyum oksit (RMC) esaslı betonların yüksek sıcaklık performansını inceledikleri çalışmalarında, hızlandırılmış karbonatlaşma ile üretilen numunelerin 300 °C'ye

kadar mekanik dayanımlarını (yaklaşık 56 MPa) büyük ölçüde koruduğunu belirlemiştir. Araştırmacılar bu termal kararlılığı, brusit fazının etrafında oluşan hidratlı magnezyum karbonatların (HMC) fiziksel bir bariyer görevi görerek dehidroksilasyonu geciktirmesine bağlamıştır. Ancak çalışma, 400 °C sıcaklığa ulaşıldığında karbonat ve hidroksit fazlarının bozunmasıyla mikroyapının gözenekli hale geldiğini ve artık basınç dayanımının 5-8 MPa seviyelerine sert bir şekilde düştüğünü rapor etmiştir.

## **GELECEK PERSPEKTİFİ, ZORLUKLAR VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK**

MOSC çimentosunun laboratuvar ortamındaki üstün performansı endüstriyel ölçüğe taşınırken, standardizasyon eksikliği, uzun vadeli durabilite verilerinin azlığı ve çevresel etki analizleri gibi kritik başlıkların ele alınması gerekmektedir.

### **Standardizasyon ve Uzun Vadeli Veri İhtiyacı**

Portland çimentosunun aksine, magnezyum esaslı çimentolar için küresel ölçekte kabul görmüş tasarım kodları ve standartlar henüz tam olarak oluşmamıştır. Walling ve Provis (2016), MOSC teknolojisinin ticari kabul görmesinin önündeki en büyük engelin, uzun vadeli durabilite verilerinin eksikliği olduğunu ve bu durumun 50-100 yıllık servis ömrü tahminlerini zorlaştırdığını vurgulamıştır. Özellikle bağlayıcı fazların (örneğin 5-1-7) uzun yıllar boyunca atmosferik koşullar ve nem döngüleri altındaki kararlılığı, halen çözülmesi gereken bir konudur.

### **Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) ve Karbon Ayak İzi**

MOSC çimentosunun “Yeşil Çimento” (Green Cement) olarak sınıflandırılmasının temelinde, üretim süreçlerinin termodinamik verimliliği ve karbon dengesi yatmaktadır. Literatürdeki veriler, bu avantajı somutlaştırmaktadır:

Düşük Karbon Emisyonu: Zhu vd. (2024), MOSC bazlı kompozitlerin (ECC) karbon ayak izini hesaplamış ve bu malzemenin üretim sürecindeki CO<sub>2</sub> emisyonunun, eşdeğer performanstaki Portland çimentosu kompozitlerine göre yaklaşık %60 oranında daha düşük olduğunu rapor etmiştir. Bu düşüş, MgO’nun kalsinasyon sıcaklığının (750-850 °C), Portland klinkerine (1450 °C) göre çok daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Sun vd. (2024) çalışmasında, MOS çimentosunun düşük enerjili üretim süreci nedeniyle Portland ve magnezyum fosfat çimentolarına kıyasla yaşam döngüsü açısından daha çevreci olduğunu doğrulamıştır.

Karbonatlaşma Potansiyeli: Walling ve Provis (2016), MOSC’un hizmet ömrü boyunca havadaki CO<sub>2</sub>’i emerek bünyesinde karbonat mineralleri (manezit, hidromanezit) oluşturduğunu belirtmiştir. Bu “karbon tutma”

(carbon sequestration) kapasitesi, malzemenin üretiminde salınan karbonun bir kısmının geri kazanılmasını sağlayarak çevresel sürdürülebilirliğe ek katkı sunmaktadır. Li vd. (2024b), MOSC bünyesindeki  $MgO$  ve  $Mg(OH)_2$  bileşenlerinin, atmosferik  $CO_2$  ile reaksiyona girerek stabil karbonat fazları oluşturduğunu ve bu sürecin malzemenin karbon negatif potansiyelini artırdığını vurgulamıştır. Bu potansiyeli nicel bir veriyle destekleyen Ruan ve Unluer (2016) ise, magnezyum çimentolarının karbonlaşma yeteneği hesaba katıldığında, “beşikten kapıya” (cradle-to-gate) yapılan yaşam döngüsü analizlerinde net  $CO_2$  emisyonlarının Portland çimentosuna kıyasla yaklaşık %73 oranında daha düşük olduğunu belirlemiştir.

**Atıkların Geri Kazanımı:** Wu vd. (2018), tuz gölü lityum üretim tesislerinden kaynaklanan ve normal şartlarda çevresel bir yük oluşturan magnezyum zengini yan ürünlerin (magnezyum cürufu), depolanmak yerine MOSC üretiminde ana hammadde olarak değerlendirilmesinin etkili bir atık yönetimi stratejisi olduğunu ortaya koymuştur.

**Tehlikeli Atıkların Stabilizasyonu:** Ayrıca, Tan vd. (2021a), MOSC’un düşük alkalitesi sayesinde, Portland çimentosunun aksine ağır metal iyonlarını (örneğin çinko zengini endüstriyel çamurları) çözmeden bünyesinde güvenle hapsedebildiğini vurgulamıştır. Bu özellik, MOSC’u sadece düşük karbonlu bir yapı malzemesi değil, aynı zamanda tehlikeli atıkların bertarafında kullanılan çevreci bir “onarım malzemesi” olarak da konumlandırmaktadır.

### **Ekonomik Analiz ve Maliyet Etkinliği**

MOSC’nin ticarileşmesinin önündeki en büyük engel olan hammadde maliyetleri, endüstriyel yan ürünlerin ve atıkların değerlendirilmesi stratejisiyle aşılmaktadır.

**Düşük Maliyetli Hammadde Alternatifi:** Wu vd. (2018), pahalı saf manyezit cevheri yerine endüstriyel yan ürünlerin kullanılmasının, MOSC üretim maliyetlerini önemli ölçüde düşürdüğünü ve bu sayede düşük maliyetli (low-cost) ancak yüksek performanslı bir bağlayıcı üretiminin ekonomik olarak mümkün olduğunu kanıtlamıştır. Li ve Chen (2024a), fosfojips (PG) ikameli MOSC harçlarının ekonomik analizini yapmış ve “Kapsamlı Maliyet İndeksi” (Comprehensive Cost Index) türetmiştir. Çalışma, %10 PG ikamesinin, birim dayanım başına düşen maliyeti kontrol grubuna göre %20.98 oranında azalttığını ortaya koymuştur. Endüstriyel atıkların (PG, cüruf, uçucu kül) hammadde olarak kullanılması, MOSC’u sadece teknik olarak değil, ekonomik olarak da Portland çimentosuna güçlü bir rakip haline getirdiği rapor edilmiştir. Zhao vd. (2024), uçucu kül (FA) ve cüruf (GGBS) ikamesinin (%45 oranında), sadece maliyeti düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda matrisin boşluklarını doldurarak 71.8 MPa gibi yüksek bir basınç dayanımı sağladığını tespit etmiştir. Zhu vd.

(2024) ise cüruf kullanımının, MOSC bazlı işlenmiş çimentolu kompozitlerin (ECC) üretim maliyetini düşürürken karbon ayak izini azalttığını vurgulamıştır.

Enerji Tasarrufu: Zhou vd. (2024) ve Li vd. (2024b) manyezit kalsinasyonunun Portland çimentosu üretimine kıyasla daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesinin, yakıt tüketiminde ve dolayısıyla işletme maliyetlerinde doğrudan bir düşüş sağladığını belirtmektedir.

## SONUÇ

Bu bölüm kapsamında sunulan literatür derlemesi, MOSC çimentosunun hem çevresel açıdan sürdürülebilir hem de mühendislik performansı yüksek bir bağlayıcı olarak gelecekte önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. MOSC'nin düşük kalsinasyon sıcaklığı ve karbonatlaşma yoluyla CO<sub>2</sub> bağlama kapasitesi, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla belirgin karbon avantajı sağlamaktadır. Bunun yanında MOSC'nin mikroyapısını belirleyen hidrasyon süreci, özellikle 5-1-7 fazının oluşumu, kullanılan MgO kaynağı, molar oranlar ve kimyasal katkılar aracılığıyla hassas bir biçimde yönlendirilebilmektedir.

Su direnci MOSC'nin tarihsel olarak en kritik zayıflığı olarak görülse de, son yıllarda geliştirilen katkı stratejileri bu sorunun büyük ölçüde aşılabileceğini göstermiştir. Örneğin, sitrik asit-sodyum aljinat kombinasyonu ile hazırlanan numunelerde yumuşama katsayısı 0.89 seviyelerine kadar çıkarılabilmüş; fosforik asit katkılı MOSC sistemlerinde bu değerin 0.94 seviyesine ulaştığı rapor edilmiştir. Mineral katkıların (silis dumanı, uçucu kül, cüruf, fosfojips) doldurucu etkisi ve faz dönüşümlerini yönlendirme kapasitesi de hem mekanik dayanımı hem de su direncini belirgin biçimde artırmaktadır.

MOSC çimentosunun bir diğer önemli özelliği yüksek sıcaklıklara karşı gösterdiği dirençtir. Literatürde fosfat atıkları, fosfojips ve florojips gibi endüstriyel yan ürünlerle modifiye edilen MOSC harçlarının 400°C'ye kadar mekanik dayanımını büyük ölçüde koruduğu, hatta bazı durumlarda dayanım artışı sergilediği gösterilmiştir. Mercan agregası kullanılan MOSC betonlarında ise 500°C seviyesine kadar dinamik dayanımın korunabildiği rapor edilmiştir. Silis dumanı katkısının yüksek sıcaklık davranışı özellikle dikkat çekicidir: 400°C'de M-S-H jeli oluşumunu teşvik ederek mikroyapının bütünlüğünü güçlendirdiği, 800°C'de ise MgO ile silis kaynakları arasında gerçekleşen katı-katı reaksiyon sonucu yüksek termal kararlılığa sahip forsterit (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) fazının oluşmasını sağlayarak artık dayanımın korunmasına katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, MOSC'nin uygun modifikasyonlarla yangın dayanımı açısından da geleneksel bağlayıcılara güçlü bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir.

MOSC çimentosunun ekonomik açıdan rekabetçiliği de giderek güçlenmektedir. Literatürde, cüruf, uçucu kül, fosfojips ve tuz gölü kaynaklı magnezyum zengini yan ürünlerin yüksek ikame oranlarında kullanılmasının,

MOSC'nin üretim maliyetini anlamlı biçimde düşürdüğü rapor edilmektedir. Özellikle tuz gölü lityum üretiminden elde edilen magnezyum yan ürünlerinin MgO kaynağı olarak değerlendirilmesi, hammaddeden kaynaklanan maliyet baskısını azaltarak MOSC'yi Portland çimentosuyla rekabet edebilir bir seviyeye taşımaktadır. Fosfojips katkılı sistemlerde birim dayanım başına maliyetin %20'nin üzerinde azalması gibi bulgular, MOSC'nin yalnızca teknik açıdan değil, ekonomik olarak da uygulanabilir bir düşük karbonlu bağlayıcı olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte MOSC'nin endüstriyel ölçekte yaygınlaşması için henüz çözülmesi gereken bazı temel sorunlar bulunmaktadır. Bunlar arasında: uzun vadeli durabilite verilerinin yetersizliği, hammadde rezervlerinin coğrafi sınırlılığı, uluslararası standart eksikliği ve büyük ölçekli üretim prosesleri için sınırlı deneyim sayılabilir. Bu bağlamda gelecekteki araştırmaların, özellikle 5-1-7 fazının uzun dönem stabilitesi, nem-sıcaklık döngülerine karşı dayanım ve su maruziyeti altındaki faz dönüşümleri, karbonatlaşma hız kinetiği, endüstriyel atıkların entegrasyonu ve kapsamlı yaşam döngüsü analizleri üzerinde yoğunlaşması gerekmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, MOSC çimentosu yüksek dayanım, iyi yangın direnci, düşük karbon ayak izi ve çok yönlü modifikasyon seçenekleri sayesinde gelecek nesil sürdürülebilir bağlayıcılar arasında güçlü bir adaydır. Üretim süreçlerinin optimize edilmesi, standartların oluşturulması ve endüstriyel atıkların etkin kullanımı ile birleştiğinde, MOSC'nin hem sürdürülebilir yapı malzemesi pazarında hem de hafif kompozit paneller ve ısı yalıtım ürünleri gibi özel uygulama alanlarında önemli bir yer edinebileceği öngörülmektedir.

## KAYNAKÇA

- Chen, C., Wu, C., Chen, Y., & Niu, J. (2018). Effect of boric acid and lithium chloride on magnesium oxysulfate cement. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 186, No. 2, p. 012064). IOP Publishing. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/186/2/012064>
- Chen, X., Zhang, T., Bi, W., & Cheeseman, C. (2019). Effect of tartaric acid and phosphoric acid on the water resistance of magnesium oxychloride (MOC) cement. *Construction and Building Materials*, 213, 528-536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.086>
- Chen, X., Wang, S., Zhou, Y., Cheeseman, C., Bi, W., & Zhang, T. (2022). Improved low-carbon magnesium oxysulfate cement pastes containing boric acid and citric acid. *Cement and Concrete Composites*, 134, 104813. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104813>
- Dung, N. T., & Unluer, C. (2018). Development of MgO concrete with enhanced hydration and carbonation mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 103, 160-169. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.011>
- Guo, J., Tan, Y., Wang, L., vd. (2021). High-efficiency and low-carbon remediation of zinc contaminated sludge by magnesium oxysulfate cement. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 124486. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124486>
- Guo, J., Wang, L., Zhang, S., vd. (2025). Dynamic mechanical behavior of magnesium oxysulfate-based titanogypsum foamed concrete: a macro- and meso-scale investigation. *Case Studies in Construction Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04870>
- Gu, K., Chen, B., & Cui, Q. (2022). Experimental research on properties of magnesium oxysulfate cement during high temperature exposure. *Composites Part B: Engineering*, 244, 110168. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110168>
- Gu, K., Chen, B., & Jiang, Z. (2023). Properties and high-temperature resistance of tailing-based magnesium oxysulfate (MOS) cement affected by phosphogypsum and water-binder ratio. *Construction and Building Materials*, 405, 133341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133341>
- Hay, R., Dung, N. T., Lesimple, A., Unluer, C., & Celik, K. (2021). Mechanical and microstructural changes in reactive magnesium oxide cement-based concrete mixes subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 118, 103955. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103955>
- Hu, Z., Guan, Y., & Zhang, Z. (2022). Performance of magnesium hydroxide gel at different alkali concentrations and its effect on properties of magnesium oxysulfate cement. *Construction and Building Materials*, 348, 128669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128669>
- Li, B., & Chen, B. (2024a). Research on the application of phosphogypsum in magnesium oxysulfate cement: A comparison with sand. *Construction and Building Materials*, 429, 136359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136359>
- Li, B., Chen, B., Liu, N., & Jiang, Z. (2024b). Understanding the positive effects of silica fume on the high-temperature resistance and water resistance of magnesium oxysulfate cement. *Construction and Building Materials*, 445, 137820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137820>
- Liang, Y., Guan, Y., & Bi, W. (2022). The effect of alcohol compound on the solidification of magnesium oxysulfate cement-boron mud blends. *Materials*, 15(4), 1446. <https://doi.org/10.3390/ma15041446>
- Matabola, K. P., Van der Merwe, E. M., Strydom, C. A., & Labuschagne, F. J. (2010). The influence of hydrating agents on the hydration of industrial magnesium oxide. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 85(12), 1569-1574. <https://doi.org/10.1002/jctb.2467>
- Qiao, Z., Fan, W., Zhang, Y., Fu, X., Yang, H., & Zhang, F. (2025). Enhancement of Magnesium Oxysulfate Cement by Acid Modifiers and Its Reaction Mechanism. *Materials*, 18(7), 1432. <https://doi.org/10.3390/ma18071432>
- Ruan, S., & Unluer, C. (2016). Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production. *Journal of Cleaner Production*, 137, 258-273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.071>
- Shand, M. A. (2006). *The Chemistry and Technology of Magnesia*. John Wiley & Sons.

- Sun, Y., Han, Y., Xu, Z., Jia, S., Li, X., & Xu, G. (2024). Preparation of magnesium oxysulfate cement with significantly improved setting rate and compressive strength using highly active magnesium oxide powders. *Ceramics International*, 50(22), 46440-46451. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.488>
- Tan, Y., Wu, C., Yu, H., Li, Y., & Wen, J. (2021a). Review of reactive magnesia-based cementitious materials: Current developments and potential applicability. *Journal of Building Engineering*, 40, 102342. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102342>
- Tan, Y., Yu, H., Sun, S., Wu, C., & Ding, H. (2021b). Properties and microstructure of basic magnesium sulfate cement: Influence of silica fume. *Construction and building materials*, 266, 121076. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121076>
- Walling, S. A., & Provis, J. L. (2016). Magnesia-based cements: a journey of 150 years, and cements for the future? *Chemical Reviews*, 116(7), 4170-4204. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00463>
- Wang, R., Qin, L., & Gao, X. (2020). Mechanical strength and water resistance of magnesium oxysulfate cement based lightweight materials. *Cement and Concrete Composites*, 109, 103554. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103554>
- Wang, R., Ji, X., Zhou, R., Jin, C., Sun, W., Wang, Z., & Yan, Y. (2024). Fabrication of high-strength, water-resistant homogeneous magnesium oxysulfate cement via synergistic modification with citric acid and sodium alginate. *Construction and Building Materials*, 457, 139473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139473>
- Wu, C., Yu, H., Zhang, H., Dong, J., Wen, J., & Tan, Y. (2015). Effects of phosphoric acid and phosphates on magnesium oxysulfate cement. *Materials and Structures*, 48, 907-917. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0202-6>
- Wu, C., Chen, W., Zhang, H., Yu, H., Zhang, W., Jiang, N., & Liu, L. (2017). The hydration mechanism and performance of modified magnesium oxysulfate cement by tartaric acid. *Construction and Building Materials*, 144, 516-524. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.222>
- Wu, C., Chen, C., Zhang, H., Tan, Y., & Yu, H. (2018). Preparation of magnesium oxysulfate cement using magnesium-rich byproducts from the production of lithium carbonate from salt lakes. *Construction and Building Materials*, 172, 597-607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.005>
- Wu, C., Luo, K., Zhang, H., & Yu, H. (2019). Effects of 5-1-7 Phase Seed Crystal on Performance of Magnesium Oxysulfate Cement. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17, 603-615. <https://doi.org/10.3151/jact.17.603>
- Wu, C., & Huang, L. (2024). Properties and effective improvement approaches of basic magnesium sulfate cement under high-temperature pre-curing. *Construction and Building Materials*, 411, 134561. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134561>
- Xiao, J., Zuo, Y., Li, P., Wang, J., & Wu, Y. (2018). Preparation and characterization of straw/magnesium cement composites with high-strength and fire-retardant. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32(13), 1437-1451. <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1422626>
- Xu, P., Chen, T., Guo, Y., Zhang, M., Feng, T., & Du, C. (2025). High temperature resistance and microstructure evolution of magnesium sulfate cement prepared by fluorogypsum. *Construction and Building Materials*, 494, 143388. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143388>
- Van der Merwe, E., Strydom, C., & Botha, A. (2004). Hydration of medium reactive industrial magnesium oxide with magnesium acetate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 77(1), 49-56. <https://doi.org/10.1023/b:jtan.0000033187.61971.1d>
- Zhang, N., Feng, W., Su, Y., vd. (2023). Different effects for phosphoric acid and calcium citrate on properties of magnesium oxysulfate cement. *Construction and Building Materials*, 374, 130931. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130931>
- Zhang, T., Zhang, J., Chang, J., vd. (2024). Hydration and strength development in magnesium oxysulfate (MOS) cement incorporating silicic acid. *Composites Part B: Engineering*, 268, 111081. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111081>
- Zhang, X., Zhang, H., & Wu, C. (2022). Influence of boron on the properties of basic magnesium sulfate cement. *Construction and Building Materials*, 327, 126951. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126951>

- Zhao, Y., He, D., Liu, X., Guo, Z., Liu, C., & Gao, J. (2024). Performance and microstructural analysis of modified magnesium oxysulfate cement with additions: Roles of FA and GGBS. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03941. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03941>
- Zhou, J., Guan, Y., Hu, Z., Bi, W., Chang, J., & Zhang, T. (2024). Performance variations of light burned magnesia under different calcination parameters and its effects on magnesium oxysulfate cement preparation. *Construction and Building Materials*, 450, 138500. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138500>
- Zhou, J., Wu, C. (2020). Effects of nano-silica and silica fume on properties of magnesium oxysulfate cement. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 128(3), 164-173. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.19192>
- Zhou, W., Zhang, A., Cao, J., vd. (2023). Performance improvement of magnesium oxysulfate cement by the combination of additives. *Construction and Building Materials*, 408, 133683. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133683>
- Zhu, M., Chen, B., Yan, P., vd. (2024). Preparation and mechanical characterization of multi-functional high-ductility engineered magnesium oxysulfate cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 147, 105428. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105428>
- Zuo, Y., Xiao, J., Wang, J., Liu, W., Li, X., & Wu, Y. (2018). Preparation and characterization of fire retardant straw/magnesium cement composites with an organic-inorganic network structure. *Construction and Building Materials*, 171, 404-413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.111>

# KONUŞMA DUYGU TANIMA ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Serkan Keser<sup>1</sup>

## GİRİŞ

İnsan iletişimi, sadece kelimelerin sözdizimsel ve anlamsal diziliminden ibaret mekanik bir süreç değildir; aksine, niyetin, ruh halinin ve sosyo-psikolojik durumun aktarıldığı çok katmanlı bir olgudur. İnsan-Bilgisayar Etkileşimi alanında son yıllarda yaşanan paradigma değişimi, makinelerin insanları sadece “ne” söyledikleriyle değil, “nasıl” söyledikleriyle de anlaması gerektiği gerçeğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, Konuşma Duygu Tanıma (Speech Emotion Recognition - SER), yapay zekâ ve sinyal işleme disiplinlerinin kesişim noktasında duran, makinelerin “duygusal zekaya” sahip olabilmesi için kritik bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır (Picard,1997: 12).

Geleneksel konuşma tanıma sistemleri, ses sinyalinin metne dönüştürmeye odaklanırken, konuşmacının o anki duygu durumuna (öfke, sevinç, üzüntü, korku vb.) dair paralinguistik ipuçlarını genellikle göz ardı etmiştir. Oysa psikolojik araştırmalar, sözlü iletişimde duygusal mesajın %38 gibi önemli bir kısmının ses tonu ve vurgu (prozodi) yoluyla iletildiğini göstermektedir (Mehrabian,1971: 86). Bu nedenle, modern yapay zekâ sistemlerinin insanlarla doğal, empatik ve sürdürülebilir bir etkileşim kurabilmesi için, ses sinyallerinde gizli olan bu akustik özniteliklerin analiz edilmesi ve anlamlandırılması bir zorunluluk haline gelmiştir.

SER sistemlerinin temel amacı, ham ses verisini işleyerek, konuşmacının duygusal durumunu temsil eden belirli bir sınıfa (kategorik) veya boyuta (valans-uyarılma) atamaktır. Ancak bu süreç, konuşma sinyalinin durağan olmayan yapısı, kişiden kişiye değişen konuşma stilleri, kültürel farklılıklar ve çevresel gürültü gibi faktörler nedeniyle karmaşık bir örüntü tanıma problemi teşkil eder.

Bu alandaki çalışmaların tarihsel gelişimine bakıldığında, literatürün iki ana ekseninde evrildiği görülmektedir: Erken dönem çalışmalar, uzman bilgisine dayalı olarak el ile çıkarılan (hand-crafted) özniteliklere odaklanmıştır. Enerji, temel frekans (F0), ses perdesi (pitch) ve formant frekansları gibi prozodik özellikler, duygu durumunu ayırt etmede kullanılan ilk parametreler olmuştur (Schuller,2018: 93). Daha sonra, insan işitme sistemini modelleyen Mel-Frekans Cepstral Katsayıları (MFCC), konuşma işlemede olduğu gibi duygu

<sup>1</sup> Doç. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, ORCID ID: 0000-0001-8435-0507; e-mail: skeser@ahievran.edu.tr

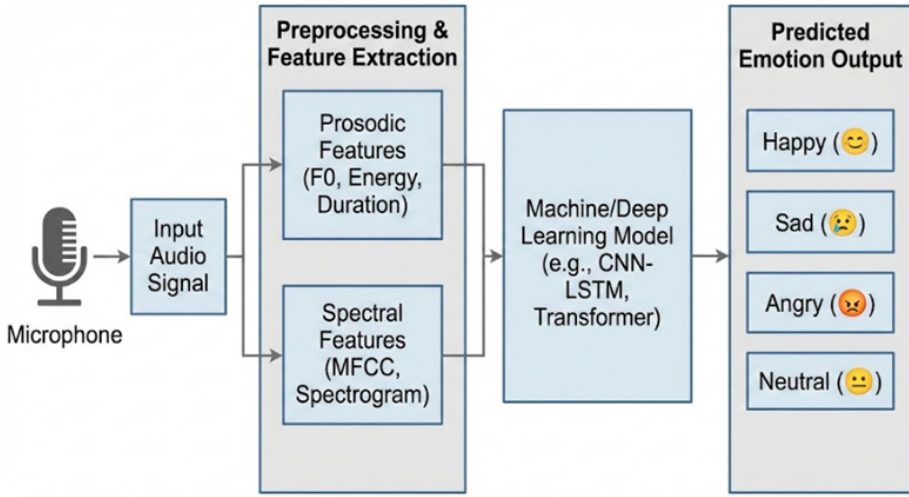
tanımada da bir endüstri standardı haline gelmiştir. Sınıflandırma aşamasında ise yöntemler, istatistiksel modellerden derin sinir ağlarına doğru dramatik bir geçiş yaşamıştır. 2000’li yılların başında Gizli Markov Modelleri (HMM) ve Destek Vektör Makineleri (SVM) gibi geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları, küçük veri setlerinde başarılı sonuçlar verirken, verinin karmaşıklığı arttıkça genelleme yetenekleri sınırlı kalmıştır (El Ayadi,2011:578).

Son on yılda hesaplama gücündeki artış ve büyük veri setlerinin erişilebilirliği, SER çalışmalarında derin öğrenme (Deep Learning) tabanlı yaklaşımların baskın hale gelmesini sağlamıştır. Özellikle Evrişimli Sinir Ağları (CNN), sesin spektrogram görüntüleri üzerinden mekansal (spatial) özellikleri öğrenmede; Uzun Kısa Vadeli Bellek (LSTM) ağları ise konuşmanın zamansal bağlamını korumada üstün performans göstermiştir (Fayek, 2015: 67). Günümüzde ise Transformer mimarileri ve dikkat mekanizmaları, ses sinyalinin hangi kısmının duygusal açıdan daha belirleyici olduğunu otonom olarak öğrenebilen “uçtan uca” modellerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Bu çalışma, konuşma duygu tanıma alanında kullanılan yöntemleri kapsamlı bir şekilde ele almayı ve bu yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını analitik bir çerçevede sunmayı amaçlamaktadır. Bölümün ilerleyen kısımlarında öncelikle ses sinyallerinden öznitelik çıkarım yöntemleri (prozodik, spektral ve ses kalitesi özellikleri) teknik detaylarıyla incelenecektir. Ardından, hem geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları (SVM, Random Forest) hem de modern derin öğrenme mimarileri (CNN, RNN/LSTM, Transformer) karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir. Son olarak, literatürdeki güncel zorluklar ve geleceğe yönelik araştırma yönelimleri tartışılacaktır.

## TEMEL AKUSTİK ÖZNİTELİKLER

Konuşma sinyali, doğası gereği yüksek boyutlu, zamanla değişen (non-stationary) ve oldukça karmaşık bir veri yapısına sahiptir. Ham ses dalgasının doğrudan sınıflandırıcıya verilmesi, verinin boyutu ve içerdiği gürültü nedeniyle genellikle verimsizdir. Bu nedenle, konuşma duygu tanıma sistemlerinde başarının anahtarı, duygusal içeriği en iyi temsil eden karakteristik özelliklerin (feature extraction) sinyalden ayrıştırılmasında yatar. Literatürde bu öznitelikler genel olarak üç ana kategoride incelenir: Prozodik, Spektral ve Ses Kalitesi özellikleri (Ververidis, 2006: 1164).



Şekil 1: Konuşma duygu tanıma blok diyagramı.

### Prozodik (Bürünsel) Öznitelikler

Prozodi, konuşmanın “ne” söylendiğinden ziyade “nasıl” söylendiği ile ilgilenen; tonlama, vurgu ve ritim gibi sözel olmayan bileşenleri kapsayan özellikler bütünüdür. Duyguların, konuşmanın segmental yapısından ziyade parçalar üstü yapısında kodlandığı varsayımına dayanır. Temel Frekans (F0), ses tellerinin saniyedeki titreşim sayısını ifade eder ve algısal karşılığı “ses perdesi”dir (pitch). Duygu analizinde en ayırt edici özelliklerden biri olarak kabul edilir. Örneğin, yüksek uyarılma içeren öfke ve sevinç gibi duygularda F0 ortalaması ve varyansı artma eğilimindeyken; üzüntü veya bıkkınlık gibi düşük enerjili F0 konturu daha düz ve düşük frekanslıdır (Juslin ve Scherer, 2005: 77). Enerji ve Şiddet, ses sinyalinin genliği ile ilişkilidir. Konuşmacının sesine ne kadar güç uyguladığını gösterir. Logaritmik enerji profili, duygusal geçişleri (örneğin ani bir bağırma veya fısıldama) yakalamada etkilidir.

**Süre ve Konuşma Hızı:** Konuşma hızı, duraksamaların sıklığı ve uzunluğu, sesli/sessiz harf süreleri gibi zamansal özelliklerdir. Korku veya stres altındaki bireylerde konuşma hızı artarken, depresyon durumunda belirgin bir yavaşlama gözlemlenir.

### Spektral Öznitelikler

Prozodik özellikler konuşmanın genel melodisini verirken, spektral özellikler sesin frekans içeriği ve tınısıyla ilgilenir. Ses yolunun fiziksel şeklinin, üretilen ses üzerindeki etkisini modeller.

**Mel-Frekans Cepstral Katsayıları (MFCC):** SER literatüründe en sık kullanılan öznitelik setidir. İnsan kulağının işitme sistemini (koklea) modelleyen Mel ölçeği üzerine kuruludur. İnsan kulağı, düşük frekanslardaki değişimlere karşı yüksek frekanslara göre daha hassastır. MFCC, ses sinyalini

kısa çerçevelere bölerek, her bir çerçevenin enerji spektrumunu Mel filtre bankalarından geçirir ve ardından Ayırık Kosinüs Dönüşümü (DCT) uygular (Logan, 2000: 2). Bu işlem, sesin “tınısını” ve fonetik karakterini yakalayarak duygusal değişimlerin (örneğin, ağlarken ses yolunun kasılması gibi) tespit edilmesini sağlar.

**Formant Frekansları:** Ses yolundaki rezonans frekanslarıdır (F1, F2, F3). Özellikle sesli harflerin telaffuzunda belirgindir. Duygusal duruma bağlı olarak ağız açıklığı ve dil pozisyonu değiştiği için formant frekanslarında kaymalar meydana gelir. Örneğin, gülümseme eylemi dudakları gererek ses yolunu kısaltır ve formant frekanslarını yukarı çeker.

### **Ses Kalitesi Öznitelikleri**

Bu kategori, sesin “dokusunu” analiz eder. Sesin net, boğuk, titreşim veya sert olup olmadığını ölçen parametrelerdir. Özellikle yüksek uyarılmalı duyguların (stres, öfke) tespitinde kritik rol oynarlar.

**Jitter ve Shimmer:** Ses sinyalindeki mikro kararsızlıkları ölçer. Jitter, temel frekansın (F0) periyotları arasındaki çevrimden çevrime olan değişimdir. Shimmer ise ses dalgasının genliğindeki (amplitude) çevrimden çevrime olan değişimdir. Ses tellerindeki gerginlik (stres) arttığında, sesin düzenliliği bozulur ve Jitter/Shimmer değerleri yükselir (Teixeira vd., 2013 :1113).

**Harmonik-Gürültü Oranı (HNR):** Ses sinyalindeki harmonik bileşenlerin gürültü bileşenlerine oranını ifade eder. Fısıldama veya korku içeren nefesli (breathy) konuşmalarda HNR değeri düşüktür.

### **ALGORİTMİK YAKLAŞIMLAR**

Konuşma Duygu Tanıma (SER) sürecinin son ve en kritik aşaması, öznitelik çıkarımı ile elde edilen sayısal verilerin (vektörlerin) anlamlı duygu sınıflarına (mutlu, üzgün, nötr vb.) dönüştürülmesidir. Bu süreç, temelde bir örüntü tanıma (pattern recognition) problemi olup, literatürde kullanılan yöntemler Geleneksel Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme olmak üzere iki ana paradigma altında incelenir.

#### **Geleneksel Makine Öğrenmesi Yaklaşımları**

Derin öğrenme devrimi öncesinde (yaklaşık 2010 öncesi), SER sistemleri “Statik Sınıflandırma” ve “Dinamik Sınıflandırma” olmak üzere ikiye ayrılan geleneksel yöntemlere dayanmaktaydı. Bu yöntemlerin ortak özelliği, giriş olarak genellikle el ile çıkarılmış özniteliklerin küresel istatistiklerini kullanmalarıdır.

**Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines - SVM):** SER literatüründe en yaygın kullanılan gözetimli öğrenme algoritmasıdır. SVM, farklı duygu sınıflarına ait veri noktalarını birbirinden en geniş marjla ayıran optimal hiper-düzlemi bulmayı amaçlar. Doğrusal olmayan konuşma verilerini

ayrıştırmak için Kernel Trick yöntemini kullanır (Cortes ve Vapnik, 1995: 274). Özellikle veri setinin küçük olduğu durumlarda yüksek genelleme başarısı gösterir, ancak eğitim süresi veri boyutuyla karesel olarak artar.

**Gizli Markov Modelleri (Hidden Markov Models - HMM):** Konuşma sinyali zamanla değişen bir yapıya sahip olduğu için, duygusal durumun da zaman içinde evrildiği varsayılır. HMM, gözlemlenebilir olaylardan (ses sinyali) gözlemlenemeyen durumları tahmin eden istatistiksel bir modeldir (Rabiner, 2002: 258). Her ne kadar konuşma tanıma (ASR) alanında uzun süre standart olsada, SER uygulamalarında duygusal geçişlerin modellenmesindeki kısıtlar nedeniyle yerini zamanla tekrarlayan sinir ağlarına (RNN) bırakmıştır.

### **Derin Öğrenme Tabanlı Yaklaşımlar**

Büyük veri setlerinin erişilebilirliği ve GPU teknolojisindeki gelişmeler, SER alanında öznitelik mühendisliği adımını ortadan kaldıran veya minimize eden “Uçtan Uca” öğrenme modellerini ön plana çıkarmıştır. Bu modeller, ham ses verisinden veya spektrogramlardan hem öznitelikleri hem de sınıflandırma kurallarını hiyerarşik olarak öğrenir.

**Evrışimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks - CNN):** Aslen görüntü işleme için geliştirilen CNN’ler, sesin frekans-zaman grafiği olan spektrogramlar (Log-Mel Spectrogram) üzerinde oldukça başarılıdır. Ses sinyalini bir görüntü gibi işleyerek, yerel frekans örüntülerini yakalar. AlexNet veya VGG gibi mimarilerin SER uyarlamaları, spektral korelasyonları öğrenmede geleneksel yöntemlere göre çok daha üstündür (Mao vd., 2014: 2204).

**Tekrarlayan Sinir Ağları ve LSTM:** Konuşma verisi sıralı (sequential) bir veridir; yani bir andaki duygu, önceki kelimelerle ilişkilidir. Standart sinir ağları bu “hafıza” özelliğinden yoksundur. Uzun Kısa Vadeli Bellek (Long Short-Term Memory - LSTM) ağları, konuşma boyunca bağlamı koruyarak uzun süreli bağımlılıkları modelleyebilir. Örneğin, cümlenin başında sakın başlayan ancak sonunda yükselen bir ses tonunu “öfke” olarak doğru sınıflandırmak için LSTM’in hafıza hücreleri kritiktir (Hochreiter ve Schmidhuber, 1997: 1736).

**Hibrit Modeller (CNN-LSTM/GRU):** Günümüzdeki en popüler mimaridir. CNN katmanları, spektrogramlardan mekansal öznitelikleri çıkarırken, bu öznitelikler zaman serisi olarak LSTM katmanlarına beslenir. Böylece hem frekans detayları hem de zamansal değişim aynı anda modellenmiş olur.

### **Dikkat Mekanizması (Attention) ve Transformerlar**

Bir konuşma kaydının tamamı duygusal bilgi taşımaz; genellikle sessizlik anları veya nötr geçişler mevcuttur. Dikkat Mekanizmaları, modelin ses sinyalinin sadece duygusal açıdan önemli kısımlarına odaklanmasını sağlar. Son yıllarda NLP alanından uyarlanan Transformer mimarileri (örneğin: Wav2Vec

2.0, HuBERT), etiketli veriye ihtiyaç duymadan büyük ses verilerinden genel konuşma temsillerini öğrenebilmekte ve ardından duygu tanıma için ince ayar yapılabilmektedir (Baevski vd., 2020: 4).

## **BULGULAR**

Konuşma Duygu Tanıma (SER) sistemlerinin başarısı, yalnızca kullanılan algoritmanın matematiksel derinliğine değil, aynı zamanda kullanılan veri setinin doğasına, deney kurgusuna ve değerlendirme kriterlerine sıkı sıkıya bağlıdır. Bu bölümde, literatürdeki temel değerlendirme metrikleri, standart veri setleri üzerindeki performans kıyaslamaları ve mevcut sistemlerin karşılaştığı temel darboğazlar tartışılacaktır.

### **Değerlendirme Metrikleri ve Kriterler**

SER çalışmalarında model performansını ölçmek için en sık kullanılan metrik Doğruluk (Accuracy) oranıdır. Ancak, duygu veri setlerinde sınıflar genellikle dengesiz dağıldığı için (örneğin, “Nötr” etiketinin “Korku” etiketinden çok daha fazla olması), doğruluk tek başına yanıltıcı olabilir. Bu nedenle, literatürde F1-Skoru, Kesinlik (Precision) ve Duyarlılık (Recall) metrikleri de standart olarak sunulur. Ayrıca, modelin hangi duyguları birbirine karıştırdığını analiz etmek için Karmaşıklık Matrisi kritik öneme sahiptir. DeneySEL sonuçlar, SER modellerinin özellikle “Valans” (hoşnutluk) boyutunda zorlandığını göstermektedir. Örneğin, Öfke (yüksek uyarılma, negatif valans) ile Mutluluk (yüksek uyarılma, pozitif valans) akustik olarak birbirine çok yakın (yüksek enerji, yüksek perde) olduğu için modeller tarafından sıkça karıştırılmaktadır (Schuller, 2011: 1063).

### **Veri Setleri ve Deney Ortamları**

Yöntemleri kıyaslarken yapılan en büyük hata, farklı veri setleri üzerindeki sonuçları doğrudan karşılaştırmaktır. Literatürde iki tür veri kaynağı hakimdir.

#### **Aktörlü Veri Setleri**

Profesyonel oyuncuların belirli duyguları stüdyo ortamında canlandığı verilerdir (Örneğin: EMO-DB, RAVDESS). Bu setlerde gürültü yoktur ve duygular abartılıdır. Geleneksel yöntemler (SVM) bu setlerde %80-90 arası yüksek başarılar yakalayabilmektedir.

#### **Doğal Veri Setleri**

Gerçek hayattan veya talk-show gibi kaynaklardan toplanan verilerdir (Örneğin: IEMOCAP). Duygular daha incelikli ve karmaşıktır. Başarı oranları bu setlerde genellikle daha düşüktür (%60-70 bandı).

### **Yöntemlerin Performans Karşılaştırması**

Son on yılda yapılan çalışmaların meta-analizi, yöntemler arasında belirgin bir hiyerarşi ortaya koymaktadır:

### Geleneksel Yöntemler (SVM/HMM)

EMO-DB gibi küçük ve temiz veri setlerinde hesaplama maliyeti/performans oranı en yüksek yöntemlerdir. Ancak IEMOCAP gibi karmaşık ve büyük veri setlerinde, özniteliklerin (MFCC vb.) elle çıkarılması, duygusal varyasyonları yakalamada yetersiz kalmakta ve başarı oranı %60'ların altında kalabilmektedir.

**Derin Öğrenme (CNN/LSTM):** Spektrogram tabanlı CNN modelleri ve LSTM ağları, “Konuşmacıdan Bağımsız” deneylerde geleneksel yöntemlere göre ortalama %5-10 daha yüksek başarı sergilemektedir. Özellikle Dikkat mekanizmalı LSTM modelleri, cümlelerin duygusal vurgusunu yakalayarak IEMOCAP üzerinde %70-75 bandında sonuçlar vermektedir (Mirsamadi vd., 2017: 2228).

### Transformer ve Transfer Öğrenme

Son dönemde Wav2Vec 2.0 gibi devasa ses verileriyle ön eğitilmiş modellerin fine-tune edilmesi, ham ses dalgasından öğrenmeyi mümkün kılmış ve veri azlığı sorununu kısmen çözmüştür. Bu modeller, mevcut benchmarklarda en yüksek doğruluk oranlarına ulaşmaktadır.

### TARTIŞMA

Elde edilen yüksek doğruluk oranlarına rağmen, SER sistemlerinin laboratuvar ortamından gerçek dünyaya taşınmasında ciddi engeller mevcuttur. Bir dilde veya bir stüdyo ortamında eğitilen model (örneğin Almanca EMO-DB), farklı bir dilde veya ortamda (örneğin İngilizce IEMOCAP) test edildiğinde performans dramatik şekilde (%30-40 civarına) düşmektedir. Akustik özellikler evrensel olsa da, kültürel ifade biçimleri yereldir. Gürültü Dayanıklılığı: Laboratuvar ortamındaki temiz seslerle eğitilen modeller, arka plan gürültüsü (sokak sesi, müzik vb.) içeren gerçek dünya verilerinde başarısız olmaktadır. Duygu Belirsizliği: İnsanlar bile bir sesi etiketlerken %100 uzlaşamazken, makinelerden kesin bir yargı beklemek zordur. Bu nedenle son araştırmalar, “Keskin Sınıflandırma” yerine “Yumuşak Etiketleme” veya Boyutsal Yaklaşım (Valans-Uyarılma düzlemi) üzerine yoğunlaşmaktadır. Aşağıdaki tablo, proje gereksinimlerimize göre hangi yöntemi seçmemiz gerektiği konusunda rehberlik edecektir.

**Tablo 1: Konuşma duygu tanıma algoritmalarının karşılaştırılması**

| Özellik                     | Geleneksel ML (SVM, RF)                   | Derin Öğrenme (CNN, LSTM)                          | Transformerlar (Wav2Vec vb.)                          |
|-----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Veri İhtiyacı</b>        | Düşük (Küçük veri setleri için ideal)     | Yüksek (Binlerce örnek gerekir)                    | Çok Yüksek (Genellikle ön eğitilmiş model kullanılır) |
| <b>Öznitelik Çıkarımı</b>   | Manuel (Uzmanlık gerektirir, MFCC vb.)    | Otomatik (Ham veriden veya spektrogramdan öğrenir) | Otomatik ve Bağlamsal                                 |
| <b>İşlem Gücü (Maliyet)</b> | Düşük (CPU yeterlidir)                    | Yüksek (GPU gereklidir)                            | Çok Yüksek (Güçlü GPU'lar gerekir)                    |
| <b>Başarı Oranı</b>         | Orta (Basit duygularda iyi)               | Yüksek                                             | Çok Yüksek (SOTA)                                     |
| <b>Eğitim Süresi</b>        | Hızlı (Dakikalar/Saatler)                 | Yavaş (Saatler/Günler)                             | Yavaş (Ancak Fine-tuning hızlı olabilir)              |
| <b>Kullanım Alanı</b>       | Gömülü sistemler, basit mobil uygulamalar | Sesli asistanlar, çağrı merkezi analizleri         | Gelişmiş duygu analizi, psikolojik analizler          |

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Konuşma Duygu Tanıma (SER) sistemlerinin temel akustik prensiplerinden başlayarak, modern derin öğrenme mimarilerine uzanan evrimi kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. İncelemeler göstermektedir ki, SER disiplini son yirmi yılda “düşük seviyeli öznitelik mühendisliği” paradigmasından, veri odaklı “uçtan uca temsil öğrenimi” paradigmasına doğru köklü bir dönüşüm geçirmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında; MFCC ve F0 gibi temel akustik özniteliklerin duygu tespitinde vazgeçilmez bir zemin oluşturduğu, ancak karmaşık ve örtük duyguların (örneğin; alaycılık, bıkkınlık) tespitinde tek başlarına yetersiz kaldığı görülmüştür. CNN ve LSTM tabanlı derin mimariler, özellikle zamansal ve spektral bağlamı birleştirerek laboratuvar ortamında üretilen veri setlerinde (EMO-DB, RAVDESS) %90'lara varan başarı oranlarına ulaşmıştır. Ancak, bu başarının gerçek dünya koşullarına (gürültülü ortamlar, spontane konuşmalar) aktarılmasında halen ciddi performans kayıpları yaşanmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Baevski, A., et al. (2020). "wav2vec 2.0: A framework for self-supervised learning of speech representations." *NeurIPS*.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). "Support-vector networks." *Machine Learning*, 20(3), 273-297.
- El Ayadi, M., Kamel, M. S., & Karray, F. (2011). "Survey on speech emotion recognition: Features, classification schemes, and databases." *Pattern Recognition*, 44(3), 572-587.
- Fayek, H. M., Lech, M., & Cavedon, L. (2017). "Evaluating deep learning architectures for Speech Emotion Recognition." *Neural Networks*, 92, 60-68.
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). "Long short-term memory." *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.
- Juslin, P. N., & Scherer, K. R. (2005). *The New Handbook of Methods in Nonverbal Behavior Research*. Oxford University Press.
- Logan, B. (2000). "Mel Frequency Cepstral Coefficients for Music Modeling." *ISMIR*, 270.
- Mao, Q., et al. (2014). "Learning salient features for speech emotion recognition using convolutional neural networks." *IEEE Transactions on Multimedia*, 16(8), 2203-2213.
- Mehrabian, A. (1971). *Silent Messages: Implicit Communication of Emotions and Attitudes*. Wadsworth.
- Mirsamadi, S., Barsoum, E., & Zhang, C. (2017). "Automatic speech emotion recognition using recurrent neural networks with local attention." *ICASSP*, 2227-2231.
- Picard, R. W. (1997). *Affective Computing*. MIT Press.
- Rabiner, L. R. (2002). A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE*, 77(2), 257-286.
- Schuller, B. W. (2018). "Speech Emotion Recognition: Two Decades in a Nutshell, Benchmarks, and Ongoing Trends." *Communications of the ACM*, 61(5), 90-99.
- Schuller, B., et al. (2011). "Recognising realistic emotions and affect in speech: State of the art and lessons learnt from the first challenge." *Speech Communication*, 53(9), 1062-1087.
- Teixeira, J. P., Oliveira, C., & Lopes, C. (2013). Vocal acoustic analysis—jitter, shimmer and hnr parameters. *Procedia technology*, 9, 1112-1122.
- Ververidis, D., & Kotropoulos, C. (2006). "Emotional speech recognition: Resources, features, and methods." *Speech Communication*, 48(9), 1162-1181.

# KIRŞEHİR-KAMAN-KALEHÖYÜK ARKEOLOJİ MÜZESİ ENVANTERİNDEKİ TAŞ, CAM VE ORGANİK TAKI PARÇALARININ ARKEOGEMOLOJİK DEĞERLENDİRMESİ

İlkay Kaydu Akbudak<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

Süstaşları ve takılar tarih boyunca estetik objeler olmakla kalmamış; aynı zamanda kültürel, sosyal ve sembolik değerler de taşımıştır (Kaydu Akbudak vd, 2017a; 2017b; Kaydu Akbudak, vd., 2023). Bunun yanında bu objelerde kullanılan yöntem ve teknikler o dönemin teknolojik durumu hakkında da ipuçları vermektedir.

Değerli ve yarı değerli taşlar, takı üretiminde sağladıkları renk çeşitliliği, dayanıklılık ve estetik katkı nedeniyle tarih boyunca tercih edilmiştir (Kılıç, 2011; Güney, ve Hatipoğlu, 2022). Bu taşlar aynı zamanda çeşitli kültürlerde inanç ve geleneklerde sembolik anlamlar da taşımaktadır (Coşkun, 2024; Çoban, 2025).

Osmanlı ve İslami dönemde boncuk, taş ya da organik malzemelerden üretilmiş küçük süs parçaları, hem günlük kullanım hem de törensel kıyafetlerin ayrılmaz parçaları olmuştur. Ayrıca kimlik göstergesi olarak ya da tılsım niteliğinde de işlev görmüştür. Anadolu coğrafyası, hem doğal hem de yapay süstaşları ile cam üretimlerinin tarihsel gelişiminin iç içe geçtiği zengin bir kültürel mirasa sahiptir. Bu miras içerisinde takı, boncuk ve cam objeler; sosyal statünün, inancın ve estetik beğenin maddi ifadesi olarak uzun bir tarihsel süreklilik göstermiştir. Türk kültüründe takıların yalnızca süs eşyası değil, aynı zamanda kimlik, güç ve mistik koruma unsuru olarak işlev gördüğü bilinmektedir. Nitekim erken Türk toplumlarında takılar, toplumsal hiyerarşiyi ve kişisel statüyü yansıtan semboller olarak değerlendirilmiştir (Coşkun, 2024; Coşkun, 2025).

Yapay camdan önce insanoğlu doğal bir cam olan obsidyeni birçok amaç için kullanmıştır. (Arda, 2018). Anadolu’da cam üretim geleneği ise Bronz Çağ’a kadar uzanmaktadır. Mezopotamya’da başlayan camın teknik ve estetik gelişimi, Mısır’dan Suriye’ye (Erten, 2025) ve oradan Roma ile Bizans’a ulaşarak Anadolu’da çeşitli üretim merkezlerinin oluşmasını sağlamıştır. Hitit Başkenti Boğazköy’de (Hattuşaş) ele geçen boncuklar ve cam kap parçaları,

<sup>1</sup> Dr.Öğr.Üyesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, ORCID ID: 0000-0003-0884-5991; e-mail: i.akbudak@ahievran.edu.tr

Anadolu’da camın üretim ve kullanımına dair en erken bulgulardır (Aslan, 2016). Bunun yanı sıra Kilis Oylum Höyük kazılarında elde edilen buluntular, Anadolu’da camın en erken kullanımına ilişkin önemli kanıtlar sunmaktadır. Daha önce bilinen en erken cam kap parçası, MÖ 2. binyıl ortalarına tarihlenen Tell Açıana (Alalakh) örnekleriyken, Oylum Höyük’te 2010 yılında Orta Tunç Çağı II tabakasında ele geçen, yüzeyi sır niteliğinde cam kaplama taşıyan bir şişe ve kulplu kap, insan yapımı camın kaplarda sırlama malzemesi olarak kullanımına ait en eski örnekleri temsil etmektedir. Bu buluntular, MÖ 2. binyıl başlarında camın işlevsel bir kaplama teknolojisi olarak Anadolu’da kullanıldığını göstermektedir (Aslan, 2016). Antik dönemden itibaren boncuklar; muska, koruyucu obje ve süs eşyası olarak kullanılmış, yapay cam teknolojisinin gelişmesiyle birlikte farklı renk ve form çeşitliliğine ulaşmıştır (Uysal, 2009; İrmak, 2022; Arda, 2024).

Anadolu’da boncuk kullanımının tarihsel derinliği Üst Paleolitik Döneme kadar inmektedir. Hatay’daki Üçağızlı Mağarası’nda tespit edilen örnekler, bu geleneğin 40.000 yıl önceye uzandığını göstermektedir (Kuhn, 2001). Doğal taş ve madenlerin işlenerek boncuk üretimi ise Neolitik Dönemde belirginleşmektedir. Örneğin Aksaray Aşıklıhöyük’te Akeramik Neolitik Döneme tarihlenen mezarlarda akik boncuklara rastlanmıştır (Esin, 1994). Zaman içinde boncuk üretiminde kullanılan teknikler gelişmiş, işleme yöntemleri çeşitlenmiş ve bölgesel hammaddelerle kültürel ihtiyaçlar arasında güçlü bir ilişki ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada ele alınan Kırşehir Kaman Kalehöyük Arkeoloji Müzesi envanterine kayıtlı, İslami ve Osmanlı dönemlerine ait toplam 14 adet takı parçası (on üç adet boncuk ve bir adet pendant) tamamıyla Kaman Kalehöyük kazılarından elde edilmiştir (Esen, vd., 2017). Boncukların hammaddeleri; taş (karnelyan, sardoniks, kristal kuvars, agat, kalsedon, ametist, tüf(?)), cam ve ahşap (organik malzeme) şeklinde çeşitlilik göstermektedir. Pendant ise sedeften (organik malzeme) üretilmiştir. Ametist, kristal kuvars, karnelyan ve kalsedonun olası hammadde kaynaklarının bölgeye en yakın olarak Yozgat (Çevik vd., 2011; Hatipoğlu vd., 2010; Selim, 2014; Kaydu Akbudak vd., 2018), Kayseri (Kaydu Akbudak ve Başibüyük, 2024) ve Tokat illerinde bulunmaktadır (Özbay Candan vd., 2022; Başibüyük, vd., 2023). Tüf kökenli malzemenin ise Kapadokya Bölgesi’nden sağlanmış olabileceği değerlendirilmektedir.

Bu eserlerde farklı renklerde (kırmızı, kahverengi, sarı, turuncu, mavi, mor vs.) ve farklı yapılarda (bantlı, renk aralanmalı, şeffaf, opak vs) süstaşları kullanılmıştır. Ayrıca form bakımından değerlendirildiğinde; boncuklarda silindirik, oval, eşkenar dörtgen, altıgen ve sekizgen geometrik şekillerin; pendantta ise damla ve baklava dilimi formunun tercih edildiği görülmüştür. Bu tür renksel, biçimsel ve ham maddesel çeşitliliğin, söz konusu eserlerin hem

üretim teknolojileri hem de dönemin sosyo-kültürel bağlamı ve estetik anlayışı açısından fikir verebileceği düşünülmektedir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, Kırşehir Kaman Kalehöyük Arkeoloji Müzesi envanterinde yer alan İslami ve Osmanlı dönemlerine ait toplam 14 adet takı unsurunun değerlendirilmesine yönelik olup; yöntemsel yaklaşım literatür taraması, müze envanteri incelemesi ve uzman görüşlerinin bütüncül biçimde kullanılmasına dayanmaktadır. İlk aşamada, müze envanter kayıtları incelenerek eserlerin malzeme bileşenleri, renk ve form özellikleri, delik yönelimleri ve boyutları gibi özellikleri not edilmiştir. İkinci aşamada, süstaşlarının mineralojik, gemolojik ve kültürel kullanımına ilişkin literatür ayrıntılı şekilde taranmış; kuvars grubu taşlarının bölgesel hammadde kaynakları, cam boncuk üretim teknolojisi ve organik materyal işçiliğine dair bilgiler değerlendirilmiştir.

## 3. ESERLERİN TANITIMI VE DEĞERLENDİRMELER

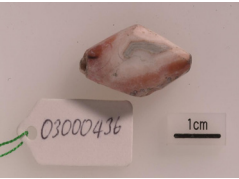
İncelenen takı parçaları, hem İslami hem de Osmanlı dönemlerinde taş işçiliği, malzeme seçimi ve estetik anlayış bakımından dikkate değer bir çeşitlilik sunduğunu göstermektedir. Sardoniks, ametist, karnelyan, kalsedon, agat ve kristal kuvars gibi yarı değerli taşların yanı sıra ahşap ve camın da süsleme geleneğinde aktif biçimde kullanılmış olması, dönemin hem yerel üretim tekniklerine hem de ticari dolaşım ağlarına işaret etmektedir. Özellikle karnelyan ve kalsedon gibi kuvars grubuna ait taşlarda gözlenen farklı form uygulamaları (silindirik, eşkenar dörtgen, sekizgen vb.) ile renk zonlanmaları, taşın doğal özelliklerinin estetik amaçlarla bilinçli şekilde değerlendirildiğini göstermektedir. Motifli örnekler ise (çiçek desenli cam boncuklar) geometrik bezemenin yanı sıra bitkisel motiflerin de tercih edildiğini göstermektedir. Bu bilgiler ışığında, dönemin takı üretiminde malzeme bilgisi, estetik bakış açısı ve teknik bilgi düzeyinin yüksek olduğunu söyleyebiliriz.

Tablo 1’de Kırşehir Kaman Kalehöyük Arkeoloji Müzesi envanterine kayıtlı, İslami ve Osmanlı dönemlerine ait takı parçalarının tanıtımı ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

**Tablo 1. Kırşehir Kaman Kalehöyük Arkeoloji Müzesi Envanterine Kayıtlı, İslami Ve Osmanlı Dönemlerine Ait Takı Parçalarının Tanıtımı Ve Değerlendirilmesi.**

| Envanter No          | Adı / Malzeme                                                                                                 | Dönem        | Ölçü                                                | Öne Çıkan Özellikler ve Değerlendirme                                                                                                                                                                                |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2011.922 (KL92-1009) | <br>Boncuk / taş (sardoniks) | İslami dönem | Yatay: 0,82 cm, Genişlik: 1,59 cm                   | Turuncu ve sarımsı beyaz renkli, bantlı yapı gösteren, şeffaf süstaşından altıgen formlu olarak işlenmiştir. Merkezde delik bulunmaktadır.                                                                           |
| 2011.890 (KL92-31)   | <br>Boncuk/ Taş (ametist)    | İslami dönem | Uzunluk:2,0 cm, Genişlik:1,64 cm, Kalınlık: 0,72 cm | Mor renkli ve şeffaf süstaşından yassı-oval formda işlenmiştir. Uzunlamasına delikli olarak işlenmiştir.                                                                                                             |
| 2011.677 (KL90-1095) | <br>Boncuk/taş (tüf(?))    | İslami dönem | Uzunluk:3,0 cm, Çap:1,2 cm                          | Taşın bir kısmı beyaz diğer kısmı siyahtır. Beyaz kısımda enine oyuklarla iki çizgisel motif; siyah kısımda ise zikzak desenli motifler bulunmaktadır. Silindirik formda ve uzunlamasına delikli olarak işlenmiştir. |
| 2011.680 (KL90-1067) | <br>Boncuk/taş (karnelyan) | İslami dönem | Uzunluk:1,1 cm, Kalınlık: 2 mm                      | Kırmızı renklidir. Eşkenar dörtgen formunda ve uzunlamasına delikli olarak işlenmiştir.                                                                                                                              |

|                      |                                                                                     |                           |                 |                                     |                                                                                                                                                            |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2011.576 (KL90-1066) |    | Boncuk/taş<br>(karnelyan) | İslami<br>dönem | Uzunluk:2,5 cm,<br>Çap:1,4 cm       | Koyu kırmızı<br>renklidir ve<br>silindirik sekizgen<br>formda işlenmiştir.<br>Uzunlamasına<br>deliklidir.                                                  |
| 2011.429 (KL89-1249) |    | Boncuk/ağşap              | İslami<br>dönem | Çap: 1,0 cm                         | Koyu kahverengidir<br>ve dairesel formda<br>üretlmıştır.<br>Merkezde delik<br>bulunmaktadır<br>ve kenar kısımlar<br>yuvarlatılmıştır.                      |
| 2011.428 (KL89-1249) |   | Boncuk/cam                | İslami<br>dönem | Çap: 1,0 cm                         | Yeşil renklidir ve<br>merkezde delik<br>bulunmaktadır. Delik<br>kanalına paralel altı<br>dilimli<br>çiçek motifi<br>benzeri bir formda<br>işlenmiştir.     |
| 2011.422 (KL89-1242) |  | Boncuk/cam                | İslami<br>dönem | Çap: 1,0 cm                         | Açık mavi renklidir<br>ve merkezde delik<br>bulunmaktadır. Delik<br>kanalına paralel altı<br>dilimli<br>çiçek motifi<br>benzeri bir formda<br>işlenmiştir. |
| 2011.418 (KL89-1238) |  | Boncuk/taş<br>(karnelyan) | İslami<br>dönem | Uzunluk:1,6 cm,<br>Kalınlık: 0,9 cm | Silindirik formda,<br>orta kısma doğru<br>şişkinleşen ve<br>uzunlamasına delikli<br>olarak işlenmiştir.                                                    |

|                                                                                                                           |                                |              |                                       |                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>2011.62 (KL88-5)</p>                  | Boncuk/cam                     | İslami dönem | Çap: 11 mm,<br>Uzunluk: 1,5 cm        | Silindirik formlu, enlemesine siyah ve yeşilimsi beyaz çizgilerle bantlı yapıda üretilmiştir. Uzunlamasına deliklidir.                                        |
| <p>2011.978 (KL93 1058)</p>              | Pendant/ Sedef                 | Osmanlı      | Uzunluk: 1,9 cm,<br>Genişlik: 1,8 cm. | Ön yüzünde traşlama ile baklava motifli oluşturulmuştur; üst kısmında ip deliği bulunmaktadır. Organik kökenli Sedef malzemeden damla formunda üretilmiştir.  |
| <p>2011.983 (KL93-1054)</p>             | Boncuk/taş<br>(kristal kuvars) | Osmanlı      | Uzunluk: 3,0 cm,<br>Çap: 0,8 cm       | Silindirik formda, üstten ve alttan yiv ile boğumlandırılmış şekilde işlenmiştir. Enine deliklidir.                                                           |
| <p>2011.979 (KL93-128)</p>             | Boncuk/taş<br>(kalsedon)       | Osmanlı      | Uzunluk: 1,6 cm,<br>Çap: 0,8 cm       | Silindirik formda, enine delikli olarak işlenmiştir. Orta kısmında enine çıkıntı bulunmaktadır. Süstaşı şeffaf olup üç farklı renk zonlanması gözlenmektedir. |
| <p>2011.1954<br/>(KL03-000436/39)</p>  | Boncuk/taş<br>(agat)           | Osmanlı      | Uzunluk: 2,5 cm,<br>Kalınlık: 0,7 cm  | Pembemsi ve kırmızımsı renk aralanmalıdır. Eşkenar dörtgen formunda; uzunlamasına delikli olarak işlenmiştir.                                                 |

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kırşehir Kaman Kalehöyük Arkeoloji Müzesi envanterine kayıtlı Osmanlı ve İslami dönemlere ait toplam on dört takı parçasına (on üç boncuk ve bir pendant) yönelik gerçekleştirilen arkeogemolojik incelemeler, koleksiyonun dönemin estetik anlayışını, malzeme tercihlerini ve zanaatkârlık geleneğini yansıtan özgün bir mikro-kültürel veri seti sunduğunu göstermiştir. Eserlerin hammaddeleri arasında cam, taş (karnelyan, kalsedon, kristal kuvars, sardoniks, agat, ametist, tuf(?)), organik materyal olan ahşap ve sedef gibi oldukça çeşitli bileşenlerin yer alması; dönemin takı üretiminde hem yerel hem de bölgesel kaynaklara erişimin mümkün olduğunu, hem de üretim tekniklerinin yüksek bir çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Malzeme bileşenlerinin çeşitliliği, yalnızca estetik tercihler açısından değil, aynı zamanda dönemin ekonomik ilişkileri ve hammaddelerin dolaşım ağı bakımından da önemli ipuçları sunmaktadır. Özellikle kalsedon, karnelyan, kristal kuvars ve ametist gibi hammaddelerin Yozgat ve Tokat çevrelerindeki jeolojik birimlerle uyumlu olması, bu taşların bölgesel kaynaklardan temin edilmiş olabileceğini düşündürmektedir. Tuf kökenli tekil örneğin ise Kapadokya yöresi ile olası bağlantısı, takı üretiminde farklı jeolojik alanlarla kurulan ilişkilerin varlığına işaret etmektedir.

Koleksiyonda yer alan takıların form özellikleri (oval, silindirik, sekizgen, altıgen ve eşkenar dörtgen boncuk tipleri ile damla formu pendant) dönemin estetik normlarıyla uyumlu olup, zanaatkârlığın sistematik bir biçim anlayışıyla beslendiğini göstermektedir. Bu biçimsel çeşitlilik, üretim tekniklerinin farklı zanaat atölyelerinde ya da farklı ustalar tarafından geliştirilmiş olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, eserlerin boyutlarının küçük olması ve işçilik niteliğinin yüksek olması, teknik bilgi birikiminin gelişmişliği yönünde önemli bir kanıttır.

Çalışmada değerlendirilen eserlerin takı parçası olarak (delikli olmalarından dolayı özellikle kolye ya da küpe) kullanıldıklarını düşündürmektedir. Ancak yine delikli olmalarından dolayı tekstil ürünlerinin bir parçası olarak kullanıldıkları da düşünülebilir.

Müze uzmanlarının çeşitli kaynaklardan, çeşitli zamanlarda ve çeşitli yollarla müze envanterine katılan buluntuları tanımlarken kullandıkları kronolojik adlandırmalar çalışma içerisinde de aynı şekilde kullanılmış olup yeniden sınıflandırma yapılması mümkündür.

Ayrıca eserlerde kullanılan süstaşlarının adlandırmaları müze uzmanlarının görüşleri, makro gözlem ve yakın çevrenin jeolojik özellikleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Daha kesin adlandırmalar tahribatsız analiz yöntemlerinden yararlanılarak yapılabilir.

## TEŞEKKÜR

Çalışmamız sırasında verdikleri destek ve izinlerden dolayı Kırşehir Kaman Kalehöyük Arkeoloji Müzesi Müdürlüğü'ne ve tüm müze çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR

- Arda, E. (2018). Cam Tornası ve Çömlekçi Çarķı İle Artistik Cam Uygulamaları. Ankara: Hacettepe Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü.
- Arda, E. (2024). Cam, Boncuk Ve Cam Fırını Yapımı, 5. International Mediterranean Scientific Research Congress, Mersin, Türkiye, 13 Ocak - 14 Şubat 2024, ss.1584-1606, (Tam Metin Bildiri)
- Aslan, T. (2016). Anadolu Coğrafyasında Bronz Çağ'dan Osmanlı'ya Farklı Kültür Ve Medeniyetlere Ait Cam Üretimlerin Gelişimi Üzerine Bir İnceleme. Uluslararası Disiplinlerarası ve Kültürlerarası Sanat, 1(1), 1-19.
- Başıbüyük, Z., Gürbüz, M., ve Kaydu Akbudak, İ., (2023). Surprise eggs, the miracle of nature: almus agates (Tokat-Türkiye). Gospodarka Surowcamı Mineralnymi-Mineral Resources Management, 5-22.
- Coşkun, M. (2024). Türk Folklorunda Takının Önemi ve Bir Kültürel Miras Olarak Takı Tasarımı. Akademik Tarih ve Düşünce Dergisi, 11(5), 3196-3209. <https://doi.org/10.46868/atdd.2024.794>
- Coşkun, M. (2025). Geleneksel El Sanatlarından, Modern Sanat Eseri Olarak Takı Sanatı. Sanat Ve Tasarım Dergisi(35 (20. Yıl Armağan Sayısı), 457-478. <https://doi.org/10.18603/sanatvetasarim.1488768>
- Çevik, N., Ayan, Z., Coşkun, E., ve Sayılı, İ. S., (2011). Belkavak Köyü (Yerköy-Yozgat) Civarındaki Kuvars ve Ametist Oluşumlarında Mikrotermometrik Özellikler. Türkiye Jeoloji Bülteni, Cilt 54, Sayı 3.
- Çoban, E. (2025). Süstaşı İşlemeciliğinin Tarihsel Gelişimi Ve Dilimlenmiş Agat Taşının Uygulama Teknikleri. Erkin (Ondokuz Mayıs Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Uluslararası Sanat Ve Tasarım Araştırmaları Dergisi), 3(1), 129-140.
- Esen, İ., Gürsoy, P., Gölbaş, A., Kaydu Akbudak, İ., ve Başıbüyük, Z. (2017). Kırşehir Kaman Kalehöyük Arkeoloji Müzesi Envanterinde Bulunan İslami ve Osmanlı Dönemlerine Ait Boncuk Ve Pendantların Jeoarkeolojik Ve Arkeogemolojik İncelemesi. Gönkuysem-2017: Geçmişten Günümüze Kuyumculuk Sempozyumu (Arkeo-Metalurji, Arkeo-Jeoloji ve Arkeo-Gemoloji), Bildiri Kitabı, s.48-49.
- Erten, A. E. (2025). Boncuk ve Vazo Yapımı Dışında Tunç Çağı'nda Camın Farklı Kullanım Biçimleri. Seleucia(XV), 71-92.
- Esin, U., (1994). Akeramik Neolitik Evrede Aşıklı Höyük. XI. Türk Tarih Kongresi Ayrı Basım, TTK Basımevi Ankara. 29-38.
- Güney, H., ve Hatipoğlu, M. (2022). Süstaşı oluşumu, işleme ve inceleme yöntemlerinin antik dönem ve günümüz kuyumculuk-takı tasarımındaki yeri. idil, 11(99), 1557–1570. <https://doi.org/10.7816/idil-11-99-03>
- Hatipoğlu, M., Babalık, H. and Chamberlain, S.C., (2010). Gemstone Deposits in Turkey, Rocks & Minerals, 85/2, 124-133
- Irmak, Y. (2022). Cam Sanatından Bir Folklorik Objeye: Nazar Boncuğu. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 19(3), 1377-1384.
- Kaydu Akbudak İ., Başıbüyük Z., Gölbaş A., Gürbüz M., (2017a). Orta Anadolu' daki (Kırşehir Müzesi Envanterinde Bulunan) Taştan Yapılmış İşlevsel Objelerin Jeoarkeolojik İncelemesi. 3.Uluslararası Sosyal Bilimler Sempozyumu (ASOS Congress), 216
- Kaydu Akbudak, İ., Gölbaş, A., ve Başıbüyük, Z. (2017b). Kırşehir Müzesi Envanterinde Bulunan Yüzüklerin Arkeogemolojik Ve Jeoarkeolojik İncelemesi. Journal of International Social Research, 10(52), 524–534. <https://doi.org/10.17719/jisr.2017.1913>
- Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük Z. ve Gürbüz, M. (2018). “ Yozgat “Aydıncık” kalsedon-ametist oluşumlarının mineralojisi-petrografisi ve ekonomikliğinin incelenmesi.” DÜMF, Mühendislik Dergisi 9:1 s. 313-324.

- Kaydu Akbudak, İ., Başbüyük, Z., Ekincioglu, G., ve Ekdur, E., (2023). Kırşehir Ve Aksaray Bölgesi Bantlı Traverten Oluşumlarının Süstaşı Olarak Kullanımı. *Uluslararası Disiplinlerarası ve Kültürlerarası Sanat*, 8(16), 1-12.
- Kaydu Akbudak, İ., ve Başbüyük, Z. (2024). Şanlıurfa çörtlerinin mineralojisi, petrografisi, jeokimyası ve süstaşı olarak kullanılabilirliği. İçinde B. Kılıç (Editör), *Mühendislik alanında gelişmeler* (1. baskı), (s.47-58). Platanus Yayın Grubu. ISBN: 978-625-6634-59-6.
- Kılıç, S. (2011). Takılarda kullanılan organik ve mineral taşların insan üzerine etkileri. *Karadeniz Araştırmaları*, (29), 119-132.
- Kuhn, S. L., Stiner, M. C., Reese, D. S., Güleç, E., (2001). Ornaments of the earliest Upper Paleolithic: New insights from the Levant. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 7641-7646.
- Özbay Candan, E., Kaydu Akbudak, İ., Başbüyük, Z., Ekincioglu, G. (2022). Tokat Nebiköy Kalsedonlarının Mineralojik-Petrografik ve Gemolojik İncelemesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 65(3), 287-296. <https://doi.org/10.25288/tjb.1121899>
- Selim, H., (2014). Türkiye'nin Değerli Ve Yarı Değerli Mücevher Taşları, İstanbul, 102s.
- Söyük Güven, M. (2023). Geleneksel Türk El Sanatlarında Cam Boncuk Sanatı, *Avrasya7th International Conference On Social Sciences*, Budapest, Macaristan, 10 - 12 Mart 2023, cilt.2, ss.856-867, (Tam Metin Bildiri)
- Uysal, Z. (2009). Kubad Abad Kazılarında (1981-2004) Bulunan Cam Boncuklar. *Sanat Tarihi Dergisi*, 16(2), 67-75.

# RİSK VE FIRSATLARI İLE BÖCEKLER: ROLÜ VE EKONOMİSİ

Tayfun Kaya<sup>1</sup>

## GİRİŞ

Böcekler, Insecta sınıfının üyesi olan 3 vücut bölmeli (baş, toraks-göğüs, abdomen-karın) ve üç çift eklemli bacağı (altıayaklı=hexapod) sahip omurgasız canlılardır. Eklembacaklılar şubesinin en büyük grubunu oluştururlar ve uçabilen tek omurgasız hayvanlardır.

Böcekler yeryüzündeki karasal ve sucul yaşam alanlarına en iyi adapte, en çeşitli, en bol ve ekolojik açıdan en önemli hayvan grubudur. Ancak bu durum tesadüfi bir durum değildir. Nitekim biyolojik, fizyolojik, morfolojik ve ekolojik özellikleri, 400 milyon yıldan fazla süredir, hayatta kalmalarını sağlayan avantaj kombinasyonları sunmaktadır (Chown ve Terblanche, 2006; Truman, 2019; Doucet ve Paine, 2023). Bunlar *i)* Zırhlı dış iskelet, omurgalılarından farklı olarak böceklerde iskelet vücut dışında bulunur. Bu iskelet yapısı çeşitli protein moleküllerini de içeren bir polisakkarit olan kitinden oluşur. Yapı vücuda sadece şekil ve destek vermekle kalmaz, aynı zamanda yaralanmalara, saldırılara, su kayıpları gibi faktörlere karşı koruma sağlar. Fiziksel ve kimyasal bir bariyer gibi işleve sahip zırh, değişen vücut kısımlarında ve/veya farklı taksonlarda esnek ve elastik ya da sert ve katı yapısı ile benzersiz mekanik avantajlar sağlar (Muthukrishnan, ve ark., 2020). *ii)* Küçük boyut, besin ve enerji açısından böcekler oldukça verimli fizyolojik ve metabolik sisteme sahiptirler. Küçük ve orantılı vücut boyutu sınırlı yaşam alanlarında hayatta kalmak ve üremek için gereken minimum kaynaklardan maksimum oranda yararlanmayı sağlarken, avcılara ile çevresel etkenlere karşı da korunma avantajı sağlar (Barragán-Fonseca, ve ark., 2020; Doucet ve Paine, 2023). *iii)* Uçma, böceklere yırtıcılardan kaçmak, yeni yaşam alanlarına ve yeni kaynaklara ulaşmanın etkili bir yolunu sağlar. Aynı zamanda verimli bir ulaşım aracıdır ve popülasyonların yeni yaşam alanlarına daha hızlı yayılmasını ve yeni kaynaklardan yararlanmasını sağlar (Muthukrishnan, ve ark., 2020; Doucet ve Paine, 2023). *iv)* Yüksek üreme potansiyeli, bir batında dişilerin çok sayıda yumurta bırakması ve bu yumurtaların çoğunun çatlaması böceklerde “yüksek doğurganlık” oranını sağlarken kısa yaşam süresi kaçınılmaz olarak üreme başarısını da arttırmaktadır Doucet ve Paine, 2023. Diğer yandan fizyolojik yapılar (dişilerde sperm depolama için spermateka),

<sup>1</sup> Doçent, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-9086-4520; e-mail: tkaya@ahievran.edu.tr

eşysiz üreme ya da *Wolbachia*, *Cardinium*, *Arsenophonus*, *Rickettsia* gibi üreme manipülatörü bakteriler yoluyla böceklerde üreme desteklenmekte, çeşitlendirilmekte ve popülasyon yoğunlukları etkilenmektedir (Duron, ve ark., 2008). v) Metamorfoz, böceklerin çoğu dört biyolojik evrede (yumurta, larva, pupa ve yetişkin) tam bir başkalaşım geçirirken, bir kısım böcekler (yumurta, nimf ve yetişkin olmak üzere yarı başkalaşım geçirir. Bu süreçler genç ve yetişkin evrelerde böceklerle gerek ekolojik niş bakımından gerekse beslenme ve büyümeye adaptasyon noktasında avantajlar sağlar (Truman, 2019; Doucet ve Paine, 2023. vi) Adaptasyon, oldukça dinamik süreç olan uyum başta biyolojik, fizyolojik ve ekolojik olmak üzere birçok faktörün kontrolü altındadır ve böceklerin çeşitli ekstrem koşullara ve/veya ortamlara uyum sağlama konusundaki olağanüstü yetenekleriyle yakından ilişkilidir. Bu yetenekler günümüzde değişen iklim koşulları ve küresel ısınmaya da bağlı olarak böceklerin yayılış alanını çeşitlendirmekte, görülme sıklığını ve derecesini artmaktadır (Schebeck ve ark., 2018; Franić ve ark., 2023). Diğer yandan en dikkat çekici örneği de dünya nüfusuna paralel olarak artan gıda talebine karşın, zararlı böcek popülasyonlarının çok çeşitli biyolojik ve kimyasal mücadele ürünlerine/araçlarına karşı direnç geliştirme hızının da dramatik bir şekilde artmasıdır (Garnas, 2018).

Genetik varyasyonlarının ve hayatta kalma başarılarının da bir sonucu olarak, günümüzde yaklaşık milyon böcek türü tanımlanmış olup, bu sayının en az 3 katı daha tanımlanmayı beklediği düşünülmektedir (Stork, 2018). Bu durum başta bitkiler olmak üzere canlılığı açısından risk oluşturmaktadır. Nitekim ekosistemdeki böceklerin %50'sinden fazlası bitkilerle beslenen (fitofagdır) (Li ve Wiens, 2023) zararlılardır. Böceklerin dünya çapında tarım ve ormancılıkta neden olduğu küresel ürün kaybının yıllık %20'yi aştığı ve yaklaşık 40 milyar dolarlık ekonomik kayba neden olduğu vurgulanmasının (Fernandez, ve ark., 2022) yanı sıra küresel ısınma ve iklim değişikliği nedeniyle yayış alanlarının genişlemesi (Schebeck ve ark., 2018; Franić, ve ark., 2023) ile mücadele yöntemlerine direnç kazanmaları (Garnas, 2018) risk unsuru taşımaktadır. Benzer nedenlere bağlı olarak zararlıların fizyolojisini ve biyolojisini hedef alarak, biyoteknik ve/veya biyoteknolojik araçlarla zararlılara karşı ekili mücadele yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik umut vaat eden çalışmalar da bulunmaktadır (Zhang, ve ark., 2024). Diğer yandan artan dünya nüfusu ve doğal kaynaklara olan talebin artmasıyla birlikte, yeterli gıda, protein ve yağ kaynakları için yem ve sürdürülebilir enerji üretimine yönelik; böceklerin biyokütle atığını enerjiye ve diğer faydalı ürünlere dönüştürmek için bir araç olarak kullanma ve aynı zamanda organik bileşenlerin iyileştirilmesi için döngüsel ekonomi kapsamında kullanılması da hem potansiyel hem de fırsat(lar) sunmaktadır (Kee, ve ark., 2023; Hamam, ve ark., 2024; Aguilar-Toalá, ve ark., 2025). Bu kapsamda ekosistemin en önemli yapı taşlarından olan böceklerin

tarihsel ve evrimsel biyolojik birikimi ile doğal sistemlerin işleyişi, gıda ve tarım perspektifinde; böcek endüstrisini döngüsel biyo-ekonomi kapsamında çevresel ve sosyal yönlerinin iliklendirilmesi amaçlanmaktadır.

## BÖCEKLERİN ROLÜ VE EKOSİSTEMLER

Yeryüzünde ekolojik sistemler bileşenleri ile hiyerarşik ve asimetrik denge halinde olup, çeşitli hizmetleri sağlayarak yaşam destek sisteminin işleyişi için kritik öneme sahiptir (Şekil 1) (Costanza, ve ark., 1997; Schowalter, ve ark., 2018; Tittone, ve ark., 2021; Barragán-Fonseca, ve ark., 2025). Eklembacalılar da bulundukları ekosistemlerin biyojeokimyasal akışlarını çevre koşullarına göre ayarlama görev alan (Schowalter, 2000) ve ekosistem istikrarına katkıda bulunan temel düzenleyicilerdir ya da diğer bir deyişle böcekler ekosistem hizmet sağlayıcıları / çevre mühendisleri olup; tedarik, düzenleyici ve destekleyici rolleri ile (Şekil 1) sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır (Schowalter, ve ark., 2018; Asritha, ve ark., 2024; Barragán-Fonseca, ve ark., 2025).

Böcekler ekosistemlerde tohum dağılımı (Cárdenas ve Pérez, 2020), biyoendikasyon (biyolojik monitör, biyomonitör veya biyoindikatör) (Chowdhury, ve ark., 2023; Pallottini, ve ark., 2023), biyolojik mücadele ve tozlaşma gibi işlevleri yerine getirerek dengeyi ve regülasyonu sağlarlar. Nitekim çiçekli bitkilerin %80'inden fazlasının tozlaştırıcı böceklere (polinatörlere) ihtiyaç duyduğu tahmin edildiğinden (Ollerton, ve ark., 2011), böcekler yaban hayatı ve dolayısıyla da ekosistemlerin vazgeçilmez bir parçasıdır. Diğer yandan polinatörler çoğu tarımsal ürünün verimliliğinin, besin döngüsünün ve besin zincirlerinin de en önemli halkasıdır (Schowalter, ve ark., 2018; Ulyshen, ve ark., 2023).



Şekil 1. Ekolojik sistemlerdeki hizmetler kapsamında eklembacalıların etki ve/veya tesir ettiği hizmet içerikleri (Tittone, ark., 2021'den derlenmiştir).

Böcekler kuşlar, memeliler, amfibiler, sürüngenler ve balıklar dahil olmak üzere yaban hayatı ve hatta insan için besin ve zincirin temelinde yer alarak tedarik kaynağıdır. Dolayısıyla başta protein olmak üzere çeşitli vitamin ve mineraller açısından karasal ve sucul ekosistemlerin en temel protein sağlayıcılarından biri durumundadırlar (Asritha, ve ark., 2024). Diğer yandan böcekler bal veya ipek gibi değerli ürünlerin üreticisidir.

Böcekler organik maddelerin ayrıştırılması ve biyodönüşümü görev alarak ve simbiyotik süreç içerisinde toprak yapısı şekillendirilmesi ile toprak alt tabakalarını havalandırarak ve organik maddeyi dağılımını sağlayarak toprağın işlenmesinde hatta toprak oluşumu noktasında önemli ekosistemleri destekleyici rolleri vardır (Verma, ve ark., 2023). Nitekim böcekler, ekosistemin kullanabileceği besin maddelerini ayrıştırarak açığa çıkarır. Normalde dışkı, ölü bitkiler ve leşlerde durgunlaşan çeşitli durumlarda risk oluşturan atık niteliğindeki bu atıklar böcekler tarafından işlenerek direk substrat olarak (pasif) ya da biyodönüşüm süreci ile biyokütle bakımından zengin şekilde ve çok kısa sürede ekosistemlere tekrar verilir (Simmons, ve ark., 2023).

Diğer yandan böceklerin avcılık ve balıkçılık, yaban hayatı gözlemi, kampçılık, eğitim ve bilimsel faaliyetler ile manevi yenilenme gibi çeşitli dini, sanatsal, eğlence amaçlı olarak kullanılmasının yanı sıra dini semboller veya kültürel imgeler/öğeler şeklinde görülmesi nedeniyle ekosistemlere kültürel katkı sağladığı da belirtilmektedir (Schowalter, ve ark., 2018).

Eklembacaklıların ekosistemlerdeki kritik rollerine karşın, özellikle son 20-30 yıllık süreç içerisinde pestisitlerin kullanımı, doğal yaşam alanlarının tahribi, bozulması veya parçalanması, iklim değişikliği ve kuraklık, kirlilik ve istilacı türlerin yayılışı gibi birçok faktörün etkisi ile böcek türlerinin çeşitliliğinde, sayısında ve popülasyon yoğunluklarında radikal değişimler (azalma/artma) görülmektedir (Hallmann, ve ark., 2017; Sánchez-Bayo, 2021; Smith, ve ark., 2022; Thill, ve ark., 2022; Renault, ve ark., 2022; Frank, 2024). Bu kapsamda çoğunlukla küresel ısınmaya bağlanan sebeplerle kuzey yarım kürede özellikle yüksek enlemlerde yeni böcek kolonizasyonlarının görülmesine, diğer bir değişle popülasyonlarda menzil kaymaları görülmektedir (Parmesan, ve ark., 1999).

Böcekler ekolojik niş olarak aynı anda birden fazla rolü üstlenmeleri ve dolayısıyla yokluklarında yerlerini ikame edebilecek doğal bir unsur bulunmadığı için ekosistemlerdeki görevleri bir kategorizasyon sınırlandırılmayacak kadar çok yönlüdür. Öyle ki, dünya ekosistemlerinin ayrılmaz ve vazgeçilmez parçası durumundaki böcekler; çevresel dengeyi ve dolayısıyla da insan yaşamı ile refahı için kritik öneme sahip unsurlardır. Böcek türlerinin yoklukları, fazlalığı ve/veya azlıkları karmaşık ekosistem dinamizminin derinden sarsıcı/bozucu etkiler gösterebilir.

### **Riskler: Zararlı-Vektörel-İstilacı Türler ve Ekonomik Zarar**

Böceklerin hayatta kalma başarılarını sağlayan biyolojik, morfolojik, fizyolojik ve ekolojik gibi avantajlı kombinasyonlarının yanı sıra çeşitlilikleri ile popülasyon yoğunluklarının fazlalığı ve ekstrem koşullara uyum sağlama yetenekleri gibi etkenler nedeniyle eklembacaklılar birer risk unsuru haline getirir. Nitekim böcek zararı, en basit ve en yüzeysel şekilde, Williams (1947) tarafından da ifade edildiği gibi yanlış yerde bulunan herhangi bir böcek olarak tanımlanabilir. Ancak böcek çeşitliliği, yoğunluğu ve etkili olduğu hedef(ler) dikkate alındığında ortaya çıkan yıkıcı sonuçlar çeşitlenir ve derinleşir. Öyle ki, bir bölgedeki ekosistemin yapısına ve nispi değerlendirmeye bağlı olarak, belirli bir böcek zararlı olarak kabul edilebilir veya edilmeyebilir (Sallam ve Bothe, 1999). Genel olarak böcek zararı; insanlar, çiftlik hayvanları ve tarım ürünleri ile sınırlandırılmakla birlikte; zarar, süreç bakımından direkt ya da dolaylı olabilir. Bazı böcek türleri doğrudan ürünler üzerinden beslenerek direkt mahsulde zarara neden olurken (Rincon, ve ark., 2019; Becerra-Garcia, ve ark., 2025), bazı böcekler vektör olarak viral ya da parazit bulaşına (Narlackar, 2018; Renault, ve ark., 2022; Chilakam, ve ark., 2023; Chagas, ve ark., 2025) sebep olur.

Diğer yandan insan dahiliyeti ile habitat tahribatları, artan küresel ısınma ve kuraklık gibi etkenler yerel ve yararlı türlerin azalmasına (hatta yok olmasına) neden olurken hem direkt hem de dolaylı zarar verme düzeyi yüksek türlerin daha agresif şekilde yayılım göstermesine ve yoğunluklarının artmasını tetiklemektedir. Diğer bir değişle söz konusu koşullar ve/veya bazı böcek türlerinin kaybı diğerlerinin artmasını sağlayabilir (Brzozowski ve Mazourek, 2018; Wan, ve ark., 2025). Bu durumu böceklerin hayatta kalma başarılarını artıran stratejiler ile adaptasyon (pestisitlere direnç geliştirme gibi) yeteneklerini de desteklemektedir. Nitekim başta tarım zararlısı olan istilacı böcek türlerinin genel böcek popülasyonlarının azalmasıyla birlikte artacağını beklentisi de oldukça yüksektir (Brzozowski ve Mazourek, 2018; Janssen ve van Rijn, 2021; Wan, ve ark., 2025). Genel olarak istilacı türler değişkenlere karşı geniş bir toleransa sahiptir ve dolayısıyla bu zararlılar daha uyumlu olma eğilimindedir. Dolayısıyla değişen koşulların istenilen ya da yararlı böcek popülasyonlarında düşüş yaşanmasına neden olurken, istilacı türlerin popülasyon sürekliliği noktasında genel olarak daha iyi göstermesi potansiyelleri nedeniyle habitat çeşitlendirme ve genişlemesi gibi daha büyük sonuçları olabilir. Bu kapsamda Zhao ve arkadaşları (2023) tarafından istilacı ve istilacı olmayan türlere yönelik yapılan kıyas çalışmasında, istilacı böceklerin genel olarak daha fazla giriş yoluna sahip olduğunu, daha fazla habitatta bulunduğunu, daha yüksek doğurganlığa, daha yüksek voltinizme, daha fazla gene, daha kısa yaşam sürelerine ve yumurtadan yetişkine daha hızlı gelişime sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu kapsamda Venette ve Hutchison (2021)

tarafından istila biyolojisi olarak tanımlanan süreç: *i)* hangi türlerin istila etme olasılığı en yüksektir; *ii)* istilaların başarılı olma olasılığı en yüksektir; *iii)* bu bilgi biyolojik istilaları yönetmek için nasıl kullanılabilir? şeklinde sorularla açıklanmaktadır. İstilalar varış, yerleşme ve yayılma aşamalarından geçerken, yönetim stratejileri tahmin ve önlemeden erken tespit ve hızlı tepkiye, azaltma ve yönetime göre değişir.

Mahsul zararından genel olarak otçul (herbivor) türler sorumludur ve dünya toplam mahsul üretiminin yıllık beşte birini yok ettiğinden sorumlu olduğu belirtilmektedir. Üstelik burada küresel ısınma ve kuraklıktan çok insan kaynaklı (habitat tahribatı, ürünlerin büyüklükleri, yüksek verimleri, besin değerleri ve sınırlı bir alanda üretim kümelenmesi gibi) nedenlerle tarımsal ekosistemlerin yaratılması yatmaktadır (Raza , ve ark., 2019; Becerra-Garcia, ve ark., 2025; Ogunkalu, 2025). Bu, yalnızca insanların ihtiyaçlarını karşılamakla kalmaz, aynı zamanda otçul böcekler için de son derece elverişli bir ortam sağlar. Her ne kadar ıslah çalışmaları ile dirençli türler seçilmeye çalışılsa da böcek istilasına oldukça çeşitli yollar ve mekanizmalarla etkili olmayı başarır (Singh, ve ark., 2023). Ek olarak tarımsal üretimde böcek zararı sadece üretim alanı ile de sınırlı değildir. Diğer bir değişle mahsullerdeki böcek zararı tarlada kalmaz depolarda da devam eder. Örneğin hububat üretiminde tarlada süne türleri zarara neden olurken, ambarlarda ise depo zararlıları ile süreç devam etmektedir. Dolayısıyla üretimde yüksek verim sağlansa da depolama sürecinde de kayıplar verilebilir (İpekdağ ve Kaya, 2020; Mutalov, ve ark., 2025).

Vektörel türler genel olarak çiftlik hayvanlarında, bitkisel üretim sahalarında (tarla ya da sera) ve/veya insanlarda zarara neden olurlar. Bu eklemli türleri ısırarak ve ısırarak sinekler, pireler, bitler, keneler (yumuşak ve sert) ve akarlar olarak gruplandırılmakla birlikte birçok bakteriyel, viral, riketsiyal ve protozoan hastalığın güçlü vektörleridir (Narladkar, 2018; Renault, ve ark., 2022; Chilakam, ve ark., 2023; Chagas, ve ark., 2025). Her ne kadar çok az tür insan sağlığı açısından risk oluştursa da (Sallam ve Bothe, 1999) patojen transferinde rol oynayan türler canlı sağlığı ve zirai üretime etki etmektedir. Vektörel bulaşın ekonomik sonuçları arasında: *i)* ısırıklarından kaynaklanan doğrudan kayıplar, ısırma ya da beslenme eylemi sırasında ortaya çıkan rahatsızlık, endişe ve psikolojik rahatsızlıklar, *ii)* bulaştırılan hastalıklar ile *iii)* kontrolleri için yapılan harcamalar vardır (Narladkar, 2018). Bu kapsamda *Culicoides* spp. (tatarcık) (Chagas, ve ark., 2025), *Aedes* spp. (sivrisinek) (Chilakam, ve ark., 2023) ve *Musca* spp. (Narladkar, 2018) gibi sinekler ve çeşitli sert kene türleri (Singh, ve ark., 2022) gibi omurgasız doğrudan etkilerine ek olarak hastalık bulaşmasında önemli rol oynar. Özellikle invaziv vektör kaynaklı hastalıklar ve bunlarla ilişkili vektör böcek türlerini insanlık için en maliyetli hayvan grubu haline getirmiştir. Ancak asıl sorunun ise maliyet tahmini noktasında bilinenden çok bilinmeyenlerin olmasıdır (Bradshaw, ve

ark., 2016). Benzer şekilde bitkisel üretimde vektörel taşınımına da aracılık etmeleridir. Öyle ki, tarla ve/veya örtü altı tarımında, *Trialeurodes* spp. (beyaz sinek) (Rincon, ve ark., 2019), *Tuta absoluta* (Becerra-Garcia, ve ark., 2025) gibi zararlılar birçok viral etmenin de transferinde rol oynar.

Dolayısıyla söz konusu doğrudan ve/veya dolaylı böcek zararı ile mücadele önem arz etmektedir. Zararlılarla mücadelede biyoteknik, biyoteknolojik ve kültürel mücadele yöntemleri bulunmakla birlikte, genel olarak en çok tercih edilen yöntem kimyasal mücadeledir (Brzozowski ve Mazourek, 2018). Ancak bu noktada ise böceklerin yeni durumlara uyum sağlayabilen biyotiplere evrimleşebilme yeteneğine sahip olmaları handikap oluşturmaktadır. Bir başka ifade ile eklem bacaklıların hayatta kalma stratejileri ile, genel olarak canlılar için toksik olan, pestisitlerin etkisini yenebilirler (doğal veya yapay bitki direncini aşabilirler) ki; bu da problemi daha da karmaşık hale getirir (Roush ve McKenzie, 1987; Lawrence ve Koundal, 2002). Ayrıca bir pestisit uygulaması sonrasında doğal düşmanların yok edilmesi ile sonuçlanır ki, bu durumda ilk toparlanan grup yine zararlılar olur ve genellikle de daha güçlü şekilde geri dönmüş olurlar (Goulson, 2013; Brzozowski ve Mazourek, 2018; Janssen ve van Rijn, 2021; Wan, ve ark., 2025). Bir diğer handikap ise, artan gıda talebi ve/veya daha fazla kazanç hırsı gibi nedenlerle, tarımsal üretimin artırılmasına yönelik baskılar da pestisit kullanım boyutunu ve dozunu arttırdığından doğal ya da organik gıdaya erişimi giderek zora sokmaktadır (Brzozowski ve Mazourek, 2018; Shekhar, ve ark., 2024; Wan, ve ark., 2025).

Ancak gıda teminine yönelik gerek iklimsel gerekse böcek zararlılarıyla rekabet olsun her zaman insanlığın karşı karşıya kaldığı bir zorluk olmuştur. Özellikle yeterli gıda arzını sağlamak için tarımsal üretime elverişli alanlarda zararlı yoğunluğunu baskılamak için çok daha fazla gayret gerektirmektedir (Wan, ve ark., 2025). Diğer yandan gıda üretimi ile talep artış hızı da dengeli olmayıp, talep lehine artmaktadır. Buna günümüzde artan küresel ısınma ve kuraklığın eklenmesiyle birlikte hem tarımsal üretimlerin belirli alanlarla sınırlandırılması hem de bu alanlara zararlı yönelmesi görüldüğünden mahsul kayıplarını azaltma noktasında; işgücü ve maliyetler bakımından ekstra yük getirmektedir (Shekhar, ve ark., 2024; Ogunkalu, 2025).

Özellikle zarara neden olan böcek türlerinin ekosistemlerde küresel olarak ekonomik maliyetinin son 50 yılda 1,288 trilyon dolar olduğu tahmin edilmektedir (Zenni, ve ark., 2021). Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ekosistemlerinde böcekler tarafından sağlanan bu ekolojik hizmetlerin yıllık değerinin ise en az 57 milyar dolar olduğunu tahmin edilmektedir ve bu hizmetlerin korunması için daha fazla yatırım yapılmasının gerektiği vurgulanmaktadır (Losey ve Vaughan, 2006). Benzer şekilde orman ekosistemlerinin zararlı tehdidine karşı korunması da hem zor hem de maliyeti yüksek bir süreçtir. Örneğin ABD’de

10 yıl içinde yıkıcı ağaç kurdu türünün istila etme olasılığı %32'dir ve özellikle odun ve floem delici böceklerin, yıllık yaklaşık 1,7 milyar dolarlık yerel yönetim harcamasına neden olması beklenmektedir (Aukema, ve ark., 2021). Aynı şekilde Kanada'nın Boreal ormanlarındaki ekosistem hizmetleri hesap edildiğinde, bu hizmetler Kanada'nın 2002 yılı GSYİH'sinin %61'ine denk geldiği ifade edilmektedir. Bunlar ekonomik değer incelendiğinde: ormanlar ve sulak alanlar tarafından karbon depolama - 582 milyar dolar, turbalıklar tarafından sel kontrolü ve su filtreleme - 77 milyar dolar; turbalık olmayan sulak alanlar tarafından sağlanan sel kontrolü, su filtreleme ve biyolojik çeşitlilik - 33,7 milyar dolar; boreal ormanlarındaki kuşlar tarafından sağlanan haşere kontrol hizmetleri - 5,4 milyar dolar; ve doğayla ilgili faaliyetler - 4,5 milyar dolardır. Bu rakam, Kanada'nın Boreal bölgesindeki ormancılık, hidroelektrik, madencilik ve petrol-gaz çıkarımının net piyasa değerinden daha değerli olduğu ifade edilmektedir (Anielski ve Wilson, 2005).

Genel olarak kara omurgasızlarının küresel ekonomiye maliyeti 2020 yılına kadar 712,44 milyar dolar düzeyinde olduğu belirtilmekle bu maliyetlerin artmakta ve çoğunlukla istilacı böceklerden (yüzde 88) kaynaklandığını vurgulamaktadır. Aynı çalışmada maliyetlerin büyük çoğunluğunun (%75) doğrudan kaynak hasarları ve kayıplarından kaynaklandığını belirtmektedir (Renault, ve ark., 2022). Bu kapsamda örneğin sera beyaz sineğinin, (*Trialeurodes vaporariorum*) nimf ve ergin beslenmesinin neden olduğu doğrudan zarar dikkate alınmazsa, vektörü olduğu Patates sarı damar hastalığının etkeni olan Patates sarı damar virüsü nedeniyle verim kayıplarının %57'ye kadar çıkabileceği vurgulanmaktadır (Guzmán-Barney ve ark., 2012; Salazar ve ark., 2000). Aynı şekilde çiftlik hayvanlarında kene (*Hyalomma* spp. ve *Rhipicephalus* spp.) türlerinin istilasında hem doğrudan hem de dolaylı (sığırlarda theileriosis, babesiosis ve anaplasmosis gibi hastalık prevalansının artması ile) verim kayıpların (süt üretiminde azalma, tedavi maliyeti, deri değer kaybı) arttığı belirtilmektedir. Dolayısıyla keneler ve kene kaynaklı hastalıklar nedeniyle oluşan kümülatif kaybın ekonomik değerinin 787,63 milyon dolar düzeyinde olduğu ifade edilmektedir (Singh, ve ark., 2022). Ayrıca dünya genelinde, sivrisinek kaynaklı vektör hastalıklar azımsanmayacak düzeyde vaka sayısı ile ölüme neden olmakta ve yılda yaklaşık 12 milyar dolarlık ekonomik maliyete yol açmaktadır (Chilakam, ve ark., 2023).

Diğer yandan zararlıların kontrol altına alınmasına yönelik pestisit uygulamalarının ekstra ekonomik maliyetler oluşturmaktadır. Nitekim ABD'de pestisit kullanımı sonucunda halk sağlığı için yılda 1,1 milyar dolar, zararlılarda pestisit direnci için 1,5 milyar dolar, pestisitlerin neden olduğu ürün kayıpları için 1,4 milyar dolar, pestisitlerden kaynaklanan kuş kayıpları için 2,2 milyar dolar ve yeraltı suyu kirliliği için 2 milyar dolar harcanmaktadır (Pimentel,

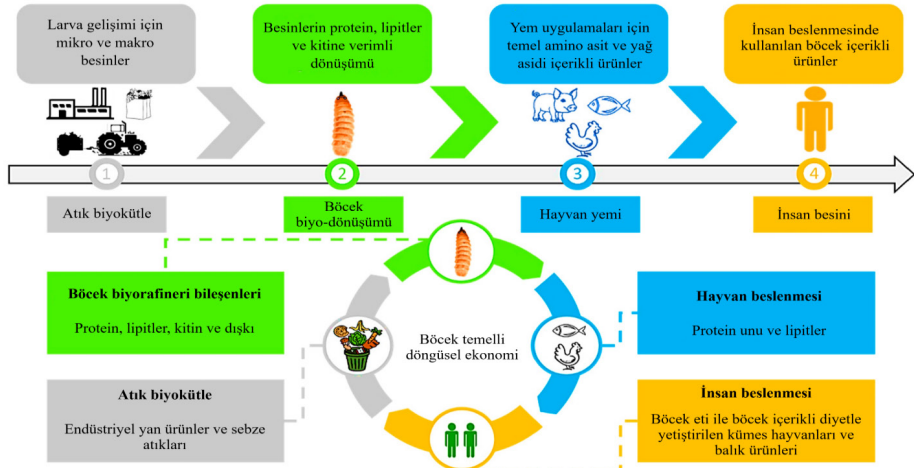
2005). Gelişmekte olan ülkelerde ise örneğin Hindistan'da zararlıların kontrol altına alınmasına yönelik kullanılan pestisitlerin maliyeti uygulanan aktif bileşenin kilogramı başına 4-19 ABD dolardır (Narladkar, 2018). Ayrıca pestisitlerin belirtilmemiş halk sağlığı riskleri tüketici ve çiftçiler için (Rufo, ve ark., 2024) hesaplanması zor olan bir diğer faktördür. Ek olarak zararlıların kontrol altına alınmasına yönelik insktsit uygulamaları kapsamında mesafe kat edilmiş çeşitli entegre zararlı yönetimi (integrated pest management, IPM) programlarını bozabilir ki; ABD'de elma üretiminde zarara neden olan *Halyomorpha hal*, hasar ve artan insektisit uygulama maliyetleri nedeniyle >37 milyon doların kaybedildiği başlıca örnektir (Venette ve Hutchison, 2021). Benzer şekilde Türkiye'de ilk kez 2017 de tespit edilen ve fındık başta olmak üzere kivi ile mısır gibi ürünlerde zarara neden olan *H. halys*'ın özellikle Karadeniz bölgesindeki yayılımı hızla artmaktadır. Bununla birlikte Türkiye'nin en önemli ihracat ürünü fındıktaki rekolte kayıplarının (%50'sinden fazla) ana sorumlularından biri haline gelmiş durumundadır. Ayrıca Giresun bölgesinde *H. halys*'ın mücadelesine yönelik olarak da 2024 yılı içerisinde 9 milyon liradan fazla harcama yapılmıştır (Nizam, 2024).

Her ne kadar biyolojik çeşitlilik değişimi ile kaybının hızlandığı bilirse de bunların ekosistem denge yapısı ile insan refahına nasıl etki edeceğine yönelik çok az şey bilinmektedir. Ancak nedeni her ne olursa olsun (doğal ya da insan faktörü sonucu nedenlere) ekosistemlerin dengelerindeki değişimler ve böceklerin ekosistem dinamiğindeki yeri dikkate alındığında habitat değişikliğinin ya da hızla sayılarının azalması/artmasının doğal sistemlerin işleyişi, gıda güvenliği, tarım ve insan sağlığı ile hem üretici hem de tüketici tarafında ekonomik maliyetlerinin olacağı aşıkardır.

## **BÖCEK BİYO-RAFİNERİSİ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ**

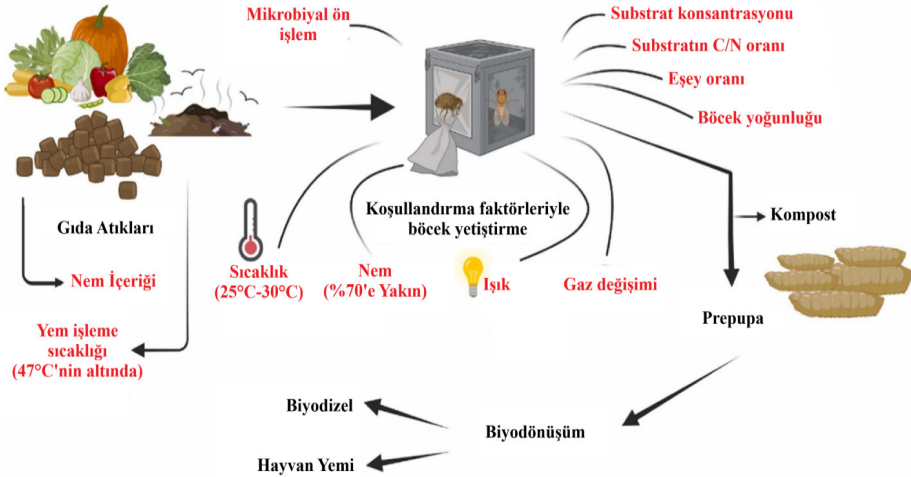
Genel olarak ekonomik ve çevre dostu bir yaklaşımla organik atıkların ve tarımsal mahsul artıklarını biyokütle ve basit organik maddelere dönüştürmesi için kullanılması biyotransformasyon olarak adlandırılır (Xu, ve ark., 2016; Abduh, ve ark., 2017). Böcek biyo-rafinerisi ise böcekleri biyokütle atığını enerjiye ve diğer faydalı ürünlere dönüştürmek için bir araç olarak kullanma ve aynı zamanda organik bileşenlerin iyileştirilmesin ifade eden kavramdır (Kee, ve ark., 2023). Bu kapsamda Avrupa Komisyonu tarafından özellikle yenilenebilir biyolojik kaynakların üretimi ve bu kaynakların ve atık akışlarının gıda, yem, biyobazlı ürünler ve biyoenerji gibi katma değerli ürünlere dönüştürülmesi döngüsel biyoekonomi olarak tanımlanır (Strategy, 2018). Diğer bir ifade ile tarımsal üretim ile endüstriyel ve/veya evsel organik atıkların böcek yemi olarak kullanarak kaynak optimizasyonu sağlayarak, (doğrusal ekonominin tersine) hammadde tüketimini azaltacak şekilde yeni bir ürün elde edilmesi döngüsel ekonomi (Şekil 2) olarak tanımlanır (Huet , ve ark., 2020; Kee, ve ark., 2023;

Safavi, ve ark., 2024; Siddiqui, ve ark., 2024). Ancak döngüsel biyoekonominin başarısı için genel olarak sanayiinin yenilenmesi-dönüşümü, üretim sistemlerinin modernizasyonu ve çevre dostu yaklaşımların benimsenmesi ile biyoçeşitliliğin korunması noktasında sürdürülebilirlik temel ilkedir (Strategy, 2018). Özellikle de atıkların gelişimi destekleyecek şekilde ve yetiştirme sistemi dahilinde (çeşitli şartlandırma faktörüyle birlikte) biyolojik dönüşüm sürecinde değerlendirilmesi (Şekil 3) (Siddiqui, ve ark., 2024) sürdürülebilirliğe katkı sunar. Dolayısıyla da doğal kaynaklara bağımlılık azaltılarak korunması ve çevresel etkiyi en aza indirilmiş olurken, hali hazırda ekosistemlerin doğal işçileri konumundaki eklembacaklılar kullanılarak biyogübre (Amorim, ve ark., 2024), hayvan yemi (Kim, ve ark., 2025), yenilebilir gıdalar (Aguilar-Toalá, ve ark., 201), biyopolimer (Huet, ve ark., 2020), biyoenzimler (Roy, 2025) ve biyodizel (Wang, ve ark., 2017) gibi biyoteknolojik katma değerli ürünler yoluyla talep ihtiyacı karşılanır (Kee, ve ark., 2023).



Şekil 2. Atık akışlarından besin geri dönüşümü ve döngüsel ekonomi (Ravi, ve ark., 2020).

2050’li yıllarda dünya nüfusunun iki katı düzeyinde katı atık ortaya çıkarak 3,4 milyar tona yükseleceği tahmin edilmektedir (Kee, ve ark., 2023; Amorim, ve ark., 2024). Özellikle artan taleple doğru oranlı olarak artacak gıda ve yem üretimi eklendiğinde daha yüksek seviyelerde tarımsal gıda atığına yol açar ki, bunlar halk sağlığı ve çevre açısından ciddi şekilde tehdit oluşturacağından, atık yönetimine yönelik yeni yaklaşımlar, strateji oluşturulması açısından önem arz eder (Mannaa, ve ark., 2024; Amorim, ve ark., 2024). Bu bağlamda böcek bazlı biyodönüşüm süreçlerinde istenilen ürüne yönelik şartlandırılmış/koşullandırılmış ortamlarda yetiştirilecek böceklerle, organik atıklardan ekonomik, çevre dostu ve teknik olarak uygulanabilir bir yaklaşım dahilinde (Siddiqui, ve ark., 2024) düşük ikameli üretim yapılabilir.



**Şekil 3. Yetiştirme sistemi için şartlandırma faktörüyle birlikte biyolojik dönüşüm süreci (Siddiqui, ve ark., 2024).**

Her ne kadar hassasiyeti yüksek ürünler (biyoenzim üretimi gibi) için yetiştirmede ekstra optimizasyon çalışmaları gerekse de böceklerin döngüsel ekonomi ve biyo-rafine yoluyla biyoteknolojik ürünlerin elde edilmesinde genel olarak “işçi” olarak kullanılacak böceklerin üretimi/yetiştirilmesi esastır. Son yıllarda bir girişimcilik formatında da değerlendirilebilecek şekilde böcek endüstrisi bağlamında böcek çiftçiliği ve yetiştiriciliği ilgi görmektedir.

### **Fırsatlar: Yenilebilir Böcekler, Düşük İkameli Böcek Çiftçiliği ve Pazar Değeri**

Dünya nüfусundaki artış ile azalan-kirlenmekte olan doğal kaynaklara yönelik talep; sağlıklı ve yeterli besin (protein ve yağ gibi) kaynaklarına talebi de attırmaktadır ve gıda güvensizliği sorununu ortaya çıkarmaktadır (Kee, ve ark., 2023). Nitekim Birleşmiş Milletler (BM) nüfus departmanı raporuna göre (US, 2022), nüfusun 2050 yılına kadar 9,7 milyara ulaşmasının beklendiği ve bu nüfusun beslenme ihtiyaçlarını karşılamak için gıda üretiminin %70 oranında artırılması gerektiği dikkate alındığında (FAO, 2016) daha az kaynak kullanarak artan gıda ve yem talebini karşılamak için alternatif yöntemlerin değerlendirilmesi gerebilir. Bu bağlamda hem gıda hem de yem için tahıllara olan talebin de yaklaşık %50 oranında artacağı tahmin edilirken, et, süt ürünleri, balık, bitkisel yağlar vb. gibi diğer gıda ürünlerine olan talebin çok daha hızlı artması beklenmektedir (Pinotti, ve ark., 2016). Dolayısıyla yenilebilir böcekler gıda güvenliği sorunlarına ve alternatif bir gıda kaynağı olarak umut vaat etmenin yanı sıra geleneksel hayvancılığa kıyasla daha verimli ve sürdürülebilir üretim süreçleri sunar (Aguilar-Toalá, ve ark., 2016).

Hali hazırda böceklerin besin kaynağı olarak kullanılması ve tüketimi (entomofaji), Güneydoğu Asya, Avustralya, Latin Amerika ve Sahra Altı

Afrikası olmak üzere birçok ülkede yaklaşık milyara yakın insanın diyeti durumundadır (Kim, ve ark., 2019; Dewangan, ve ark., 2025). Dünya çapında aralarında arılar, eşek arıları, karıncalar; çekirgeler, ağustos böcekleri ve cırcır böcekleri, yusufçuklar, termitler, sinekler, hamamböcekleri ve örümceklerin de olduğu 2000’den fazla yenilebilir böcek türünün tüketildiği belirtilmektedir (Van Huis, ve ark., 2013; Jongema, 2017). Bu böceklerden un kurdu, kara asker sineği (BSF), çekirge, kara sinek ve ipek böceği gibi böceklerin larva üretimi yoluyla organik atıkları protein ve yağlara etkili bir şekilde dönüştürdüğü bildirilmiştir (Rajendran vd., 2018). Bununla birlikte Orkus (2021) tarafından 100 gr yenilebilir böcek ve 100 gr et (taze ağırlık) ile yapılan çalışmada; her ikisinin de insan vücudunun düzgün gelişimi ve işleyişi için gerekli besinler açısından kabul edilebilir ve içerik bakımından zengin olduğu belirtilmektedir. İncelen böceklerden ipekböceğinin (*Bombyx mori*) (23,1 g/100 g), mopan kurdunun (*Gonimbrasia belina*) (35,2 g/100 g) ve un kurdunun larva formlarının (*Tenebrion molitor*) (25,0 g/100 g) ve *Tenebrio molitor*’un yetişkin formlarının (24,13 g/100 g) ete kıyasla daha üstün bir protein içeriği sergilediği belirlenmiştir. Çalışma yenilebilir böceklerin değerli bir gıda ürünü olduğunu, insan beslenmesinde yaygın olarak kullanılmalrı, küresel yetersiz beslenme sorununun çözümüne yardımcı olabileceği belirtilmektedir (Orkus, 2021). Dahası yenilebilir böceklerin temel element içerikleri de (genel olarak larvalar yetişkinlerden daha fazla olmakla birlikte) hayli yüksektir. Nitekim özellikle, *T. molitor* larvaları yüksek seviyelerde K, Ca, Mg, Na, fosfor, Cu, Zn ve Se içerir (Lu, ve ark., 2024).

Bunlara karşın böcek çiftçiliğinin teorik faydalarına karşın göz ardı edilen bazı handikapları olduğunu ileri süren çalışmalarda vardır ki, i) özellikle çevresel etkilerine dair az sayıdaki ve eski çalışmaya aşırı güvenilmesi; ii) gıda atıklarını değerlendirilebileceğine yönelik yaygın varsayım; ile iii) ticari koşullar altında geçerli olmayan teorik fiyat projeksiyonlarına güvenilmesinin hata olduğu vurgulanmaktadır (Biteau, ve ark., 2025). Diğer yandan Avrupa’da başlangıçta böcek bazlı yem ve gıdalar yasal ya da mevzuat çerçevesinde büyük ölçüde (2015/2283, 2468/2017 ve 2469/2017 sayılı Avrupa Tüzüklerinin yürürlüğe girmesinden önce) tanımsızdı (Safavi, ve ark., 2024).

Ancak daha önce her ne kadar mesafeli durulsa da endüstriyel böcek üretiminin teknolojik ilerlemeleri hızlı bir ilerleme sonucunda Avrupa Birliği normlarına göre ve Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi’nin (EFSA) bilimsel değerlendirmeleri sonucunda böcekler açıkça “yeni gıdalar” olarak sınıflandırılmıştır (EFSA, 2015; Safavi, ve ark., 2024). Bu kapsamda 2015/2283 sayılı tüzüğünde yar alan mevzuata göre, Avrupa Konseyi’nin şartlarını karşılayan ve EFSA onayı alan ürünler hem insanlar hem de hayvanlar için gıda olarak kullanıma potansiyeli yüksek olduğunu belirtmiş ve bu doğrultuda böcek türlerinin bir

listesini önermiştir. Ayrıca Avrupa Birliği, Temmuz 2021’de ilk böcek türünün (*Tenebrio molitor* böceğinin ısıyla kurutulmuş larvalarının hem bütün hem de toz halinde) tüketimi için onay vermiştir (EFSA, 2015; EFSA, 2021).

Tüketime (gıda, yem, diğer) yönelik yenilebilir böcek üretimi temel olarak üç yöntemle gerçekleşir: bunlar yabancı hasat, yarı evcilleştirme ve çiftçiliktir (Safavi, ve ark., 2024). Çiftçiliğin ana girdisi besleme materyali olmakla birlikte optimum koşullarının sağlanması da maliyet oluşturmaktadır. Ancak besin olarak kullanılan hammaddelerin döngüsel ekonomi kapsamında genel olarak zirai ve/veya evsel organik atıkların kullanılması nedeniyle hem maliyet düşürücü hem de çevreci bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca çiftçilik sürecinde böceklerin kısa yaşam döngüsüne sahip olması, daha az arazi ve su kullanımına ihtiyaç duyulması, daha düşük sera gazı emisyonu salınımı ve geleneksel hayvancılığa kıyasla daha yüksek yem dönüşüm verimliliği ise hem çevreci hem de işletme maliyetlerinin azaltıcı faktörleri oluşturmaktadır (Van Huis ve Oonincx, 2017; Madau, ve ark., 2020; Tepper, ve ark., 2024; Mohamad, ve ark., 2025).

Günümüzde endüstriyel böcek üretimine yönelik ilerleme hızı artan ivmelenme görülmektedir ki, bu kapsamda geleceğe dönük üretim projeksiyonları yapılmaktadır. Nitekim Avrupa özelinde 2018’de 2000 ton olan yenilebilir böceklerin toplam üretiminin 2025 yılında 1,2 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir (Wunsch, 2020). Diğer yandan küresel ölçekte ise Research and Markets’in 2024-2033 dönemini kapsayan yenilebilir böcek (tam böcek, böcek tozu, böcek unu, böcek yağı dahil) pazarının %28,6’lık yıllık büyüme oranıyla 2033 yılına kadar 17,9 milyar dolara ulaşması, hacim açısından ise pazarın 2033 yılına kadar %36,3’lük yıllık büyüme oranıyla 4,7 milyon tona ulaşması beklenmektedir (Research and Markets, 2025). Bununla birlikte Avrupa’da böcek yemi işletmelerinin toplam yıllık mali cirosunun 2030 yılı sonuna kadar yılda 2 milyar avroyu aşması öngörülmektedir (IPIFF, 2021) ki, bu da bu sektördeki genişleyen pazarın dinamizmini (Dewangan, ve ark., 2025) ve ayrıca çok yönlü boyutunu (girişimcilik, istihdam vb.) ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak dünya nüfustaki artış hızı, ekonomik kalkınma ve şehirleşme gibi faktörler gıda ve atık yönetimi başta olmak üzere yüksek talebi oluşturmakta maliyetlerin karşılanması için de potansiyel baskı oluşturmaktadır. Buna asimetrik hiyerarşi içerisindeki ekosistem doğal denge maliyetleri de eklendiğinde küresel bir yük daha da artmaktadır. Nitekim 1997 projeksiyonlarına göre 16 biyom için 17 ekosistem hizmetinin güncel ekonomik değerinin; tüm biyosfer için (çoğu piyasa dışında olan) değerin yıllık 16-54 trilyon doları aralığında olduğu, (ortalama yılda 33 trilyon dolar) tahmin edilmektedir (Costanza, ve ark., 1997). Dolayısıyla gerek ekolojik gerekse iktisadi anlamda ya da bütünsel bakış yaşam destek sisteminin işleyişi için

ekosistem bileşenlerin hem korunması hem de belirli stratejiler doğrultusunda kullanılması kritik önem taşır. Bu bağlamda böcekler biyoçeşitlilikleri ve ekolojik nişleri dikkate alındığında ekosistemlerin dinamizmi açısından zorunlu türler olmakla birlikte; (değişen doğal denge nedeniyle) artan popülasyon yoğunlukları ya da yok olma gibi nedenler risk oluşturmaktadır. Diğer yandan böcekler ekosistem hizmetleri kapsamındaki (tedarik, destekleme, regülasyon ve kültürel) işlevleri ve/veya biyodönüşüm süreci içerisinde biyorafinasyon ile katma değerli ürünlerin üretilmesi gibi inovatif yaklaşımlar ile gıda, çevresel sürdürülebilirlik, kaynakların etkin kullanımı ve verimlilik açısından çeşitli ikilemlere, açmazlara ve zorluklara çözüm üretmede fırsatlar sunmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Abdub, M. Y., Manurung, R., Faustina, A., Affanda, E., Siregar, I. R. H., & Muhammad, C. (2017). Bioconversion of *Pandanus tectorius* using black soldier fly larvae for the production of edible oil and protein-rich biomass. *J Entomol Zool Stud*, 5(1), 803-809.
- Aguiar-Toalá, J. E., Vidal-Limón, A. M., & Liceaga, A. M. (2025). Advancing Food Security with Farmed Edible Insects: Economic, Social, and Environmental Aspects. *Insects*, 16(1), 67.
- Amorim, H. C., Ashworth, A. J., Arsi, K., Rojas, M. G., Morales-Ramos, J. A., Donoghue, A., & Robinson, K. (2024). Insect frass composition and potential use as an organic fertilizer in circular economies. *Journal of Economic Entomology*, 117(4), 1261-1268.
- Anielski, M., & Wilson, S. (2005). Counting Canada's natural capital. Assessing the real value of Canada's boreal ecosystems. The Pembina Institute. Online erişim: <https://www.cbd.int/financial/values/canada-countcapital.pdf> (Kasım 2025'de erişilmiştir)
- Asritha, C., Anil, M., Teena, P., Ramesh, N. M., & Maharaj, S. (2024). Scope and future of ecosystem services in entomology. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(9), 437-447.
- Aukema, J. E., Leung, B., Kovacs, K., Chivers, C., Britton, K. O., Englin, J., ... & Von Holle, B. (2011). Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States. *PLoS one*, 6(9), e24587.
- Bradshaw, C. J., Leroy, B., Bellard, C., Roiz, D., Albert, C., Fournier, A., ... & Courchamp, F. (2016). Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects. *Nature communications*, 7(1), 12986.
- Barragán-Fonseca, K. B., Ortiz, J. E., García-Arteaga, J. D., & Giron, D. (2025). The role of insects in agri-food sustainability: Taking advantage of ecosystem services to achieve integrated insect management. *Insects*, 16(8), 866.
- Becerra-Garcia, R. E., Hernandez-Pelegrin, L., Crava, C. M., & Herrero, S. (2025). Characterization of the *Tuta absoluta* virome reveals higher viral diversity in field populations. *Journal of Invertebrate Pathology*, 211, 108340.
- Biteau, C., Bry-Chevalier, T., Crummett, D., Ryba, R., & St. Jules, M. (2025). Bugs in the system: The logic of insect farming research is flawed by unfounded assumptions. *npj Sustainable Agriculture*, 3(1), 9.
- Brzozowski, L., & Mazourek, M. (2018). A sustainable agricultural future relies on the transition to organic agroecological pest management. *Sustainability*, 10(6), 2023.
- Chowdhury, S., Dubey, V. K., Choudhury, S., Das, A., Jeengar, D., Sujatha, B., ... & Kumar, V. (2023). Insects as bioindicator: A hidden gem for environmental monitoring. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1146052.
- Cárdenas Muñoz, R. E., & Crespo Pérez, M. V. M. V. (2020). The importance of insects on land and in water: a tropical view.
- Chagas, C. R. F., Bernotienė, R., Bobeva, A., Bukauskaitė, D., Ferraguti, M., Gutiérrez-Lopez, R., ... & Martínez-de la Puente, J. (2025). A literature review on the role of Culicoides in the transmission of avian blood parasites in Europe. *Parasites & Vectors*, 18(1), 329.
- Chilakam, N., Lakshminarayanan, V., Keremutt, S., Rajendran, A., Thunga, G., Poojari, P. G., ... & John, D. (2023). Economic burden of mosquito-borne diseases in low-and middle-income countries: Protocol for a systematic review. *JMIR Research Protocols*, 12(1), e50985.
- Chown, S. L., & Terblanche, J. S. (2006). Physiological diversity in insects: ecological and evolutionary contexts. *Advances in insect physiology*, 33, 50-152.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *nature*, 387(6630), 253-260.
- Dewangan, B., Panda, A. K., Kerketta, S., Kerketta, A., Bhatnagar, P. S., Mishra, R., ... & Bisht, S. S. (2025). Reassuring insect farming ensures waste minimization and future food security. *Discover Sustainability*, 6(1), 451.
- Doucet, D., & Paine, T. D. (2023). Form and Function. In *Forest Entomology and Pathology: Volume 1: Entomology* (pp. 19-43). Cham: Springer International Publishing.
- Duron, O., Bouchon, D., Boutin, S., Bellamy, L., Zhou, L., Engelstädter, J., & Hurst, G. D. (2008).

- The diversity of reproductive parasites among arthropods: Wolbachia do not walk alone. *BMC biology*, 6(1), 27.
- EFSA Scientific Committee. Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. *EFSA J.* 2015, 13, 4257.
- EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA), Turck, D., Bohn, T., Castenmiller, J., De Henaau, S., Hirsch-Ernst, K. I., ... & Knutsen, H. K. (2021). Safety of frozen and dried formulations from whole yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA journal*, 19(8), e06778.
- FAO (2016) The state of world fisheries and aquaculture: opportunities and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Fernandez, R. M., Petek, M., Gerasymenko, I., Juteršek, M., Baebler, Š., Kallam, K., ... & Patron, N. J. (2022). Insect pest management in the age of synthetic biology. *Plant Biotechnology Journal*, 20(1), 25-36.
- Franić, I., Allan, E., Prospero, S., Adamson, K., Attorre, F., Auger-Rozenberg, M. A., ... & Eschen, R. (2023). Climate, host and geography shape insect and fungal communities of trees. *Scientific reports*, 13(1), 11570.
- Frank, E. G. (2024). The economic impacts of ecosystem disruptions: Costs from substituting biological pest control. *Science*, 385(6713), eadg0344.
- Garnas, J. R. (2018). Rapid evolution of insects to global environmental change: conceptual issues and empirical gaps. *Current Opinion in Insect Science*, 29, 93-101.
- Gippet, J. M., Liebhold, A. M., Fenn-Moltu, G., & Bertelsmeier, C. (2019). Human-mediated dispersal in insects. *Current opinion in insect science*, 35, 96-102.
- Goulson, D. (2013). An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977-987.
- Guzmán-Barney, M., Franco-Lara, L., Rodríguez, D., Vargas, L., & Fierro, J. E. (2012). Yield losses in *Solanum tuberosum* Group Phureja cultivar Criolla Colombia in plants with symptoms of PVYV in field trials. *American Journal of Potato Research*, 89(6), 438-447.
- Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., ... & De Kroon, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PloS one*, 12(10), e0185809.
- Hamam, M., D'Amico, M., & Di Vita, G. (2024). Advances in the insect industry within a circular bioeconomy context: a research agenda. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 29.
- Huet, G., Hadad, C., Husson, E., Laclef, S., Lambertyn, V., Farias, M. A., ... & Van Nhien, A. N. (2020). Straightforward extraction and selective bioconversion of high purity chitin from *Bombyx eri* larva: Toward an integrated insect biorefinery. *Carbohydrate Polymers*, 228, 115382.
- IPIFF. (2021). An overview of the European market of insects as feed. Online erişim: [https://ipiff.org/wp-content/uploads/2021/04/Apr-27-2021-IPIFF\\_The-European-market-of-insects-as-feed.pdf](https://ipiff.org/wp-content/uploads/2021/04/Apr-27-2021-IPIFF_The-European-market-of-insects-as-feed.pdf) (Kasım 2025'de erişilmiştir)
- İpekdağ, K., & Kaya, T. (2020). Screening stored wheat beetles for reproductive parasitic endosymbionts in central Turkey. *Journal of Stored Products Research*, 89, 101732.
- Kee, P. E., Cheng, Y. S., Chang, J. S., Yim, H. S., Tan, J. C. Y., Lam, S. S., ... & Khoo, K. S. (2023). Insect biorefinery: A circular economy concept for biowaste conversion to value-added products. *Environmental research*, 221, 115284.
- Kim, T. K., Yong, H. I., Kim, Y. B., Kim, H. W., & Choi, Y. S. (2019). Edible insects as a protein source: a review of public perception, processing technology, and research trends. *Food science of animal resources*, 39(4), 521.
- Kim, J. Y., Park, J., Lee, D. J., Choi, Y. B., Choi, Y., Park, W. K., ... & Kwon, E. E. (2025). Enhancing sustainability in meat production through insect biorefinery. *npj Science of Food*, 9(1), 65.
- Lawrence, P. K., & Koundal, K. R. (2002). Plant protease inhibitors in control of phytophagous insects. *Electronic Journal of Biotechnology*, 5(1), 5-6.
- Li, X., & Wiens, J. J. (2023). Estimating global biodiversity: the role of cryptic insect species. *Systematic Biology*, 72(2), 391-403.
- Losey, J. E., & Vaughan, M. (2006). The economic value of ecological services provided by insects. *Bioscience*, 56(4), 311-323.

- Lu, M., Zhu, C., Smetana, S., Zhao, M., Zhang, H., Zhang, F., & Du, Y. (2024). Minerals in edible insects: A review of content and potential for sustainable sourcing. *Food Science and Human Wellness*, 13(1), 65-74.
- Janssen, A., & van Rijn, P. C. (2021). Pesticides do not significantly reduce arthropod pest densities in the presence of natural enemies. *Ecology letters*, 24(9), 2010-2024.
- Jongema, Y. LIST2017 avh.xls (wur.nl). List of edible insects of the world-WUR, 2017. Available online: <https://www.wur.nl/en/Research-Results/Chair-groups/Plant-Sciences/Laboratory-of-Entomology/Edible-insects/Worldwide-species-list.htm> (accessed on 29 November 2025).
- Madau, F. A., Arru, B., Furesi, R., & Pulina, P. (2020). Insect farming for feed and food production from a circular business model perspective. *Sustainability*, 12(13), 5418.
- Mannaa, M., Mansour, A., Park, I., Lee, D. W., & Seo, Y. S. (2024). Insect-based agri-food waste valorization: Agricultural applications and roles of insect gut microbiota. *Environmental Science and Ecotechnology*, 17, 100287.
- Mohamad, A., Tan, C. K., Shah, N. N. A. K., Nayan, N., Ibrahim, A., Abdi, G., & Aadil, R. M. (2025). Insect protein: A pathway to sustainable protein supply chains, challenges, and prospects. *Journal of Agriculture and Food Research*, 101678.
- Mutalov, A., Kalandarov, P., Kannazarova, Z., Gazieva, R., & Shavazov, K. (2025). Comprehensive strategies for managing stored grains: Tackling insect infestation and quality loss: A review. *Journal of Stored Products Research*, 112, 102624.
- Muthukrishnan, S., Mun, S., Noh, M. Y., Geisbrecht, E. R., & Arakane, Y. (2020). Insect cuticular chitin contributes to form and function. *Current pharmaceutical design*, 26(29), 3530-3545.
- Narladkar, B. W. (2018). Projected economic losses due to vector and vector-borne parasitic diseases in livestock of India and its significance in implementing the concept of integrated practices for vector management. *Veterinary world*, 11(2), 151.
- Nizam, E., (2024), Fındık Dergisi, Giresun Ticaret Borsası Yayın Organı. Online erişim: <https://www.giresuntb.org.tr/ALBUM/FINDIKDERGI/Aral%C4%B1k-2024.pdf> (Kasım 2025’de erişilmiştir)
- Ogunkalu, O. E. (2025). Climate Change and Global Warming on Food Production in World. *Eurasian Journal of Food Science and Technology*, 9(1), 27-35.
- Ollerton, J., Winfree, R., & Tarrant, S. (2011). How many flowering plants are pollinated by animals?. *Oikos*, 120(3), 321-326.
- Orkusz, A. (2021). Edible insects versus meat—Nutritional comparison: Knowledge of their composition is the key to good health. *Nutrients*, 13(4), 1207.
- Pallottini, M., Goretti, E., Argenti, C., La Porta, G., Tositti, L., Dinelli, E., ... & Cappelletti, D. (2023). Butterflies as bioindicators of metal contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(42), 95606-95620.
- Parnesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill, J. K., Thomas, C. D., Descimon, H., ... & Warren, M. (1999). Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 399(6736), 579-583.
- Pimentel, D. (2005). Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. *Environment, development and sustainability*, 7(2), 229-252.
- Pinotti, L., Caprarulo, V., Ottoboni, M., Giromini, C., Agazzi, A., Rossi, L., ... & Lević, J. (2016). FEEDNEEDS: Trends in R&D in the Italian and Serbian feed sectors. In *Serbia-Italia: Italian-Serbian Bilateral Cooperation on Science, Technology and Humanities* (Vol. 3, pp. 21-25). Museum of Yugoslav History, Belgrade.
- Research and Markets, Global Edible Insects Market Size, Share, Forecast, & Trends Analysis by Product, Insect Type, Application, and Geography-Forecast to 2033. Online erişim: <https://www.researchandmarkets.com/report/edible-insects> (Kasım 2025’de erişilmiştir).
- Rajendran, K., Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., & Khanal, S. K. (2018). Insect-based biorefinery for bioenergy and bio-based products. In *Waste Biorefinery* (pp. 657-669). Elsevier.
- Raza, A., Razaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8(2), 34.
- Ravi, H. K., Degrou, A., Costil, J., Trespeuch, C., Chemat, F., & Vian, M. A. (2020). Larvae mediated valorization of industrial, agriculture and food wastes: Biorefinery concept through bioconversion, processes, procedures, and products. *Processes*, 8(7), 857.

- Renault, D., Angulo, E., Cuthbert, R. N., Haubrock, P. J., Capinha, C., Bang, A., ... & Courchamp, F. (2022). The magnitude, diversity, and distribution of the economic costs of invasive terrestrial invertebrates worldwide. *Science of the Total Environment*, 835, 155391.
- Rincon, D. F., Vasquez, D. F., Rivera-Trujillo, H. F., Beltrán, C., & Borrero-Echeverry, F. (2019). Economic injury levels for the potato yellow vein disease and its vector, *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae), affecting potato crops in the Andes. *Crop Protection*, 119, 52-58.
- Roush, R.T. and McKenzie, J.A. Ecological and genetics of insecticide and aricide resistance. *Annual Review of Entomology*, 1987, vol. 32, p. 361-381.
- Roy, R. N. (2025). The Role of Insect and Insect Enzymes in Environment with References to Plastic Waste Management. In *Sustainable Remediation for Pollution and Climate Resilience* (pp. 507-533). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Rufo, E., Brouwer, R., & van Beukering, P. (2024). The social costs of pesticides: a meta-analysis of the experimental and stated preference literature. *Scientific Reports*, 14(1), 31905.
- Safavi, A., Thrastardottir, R., Thorarinsdottir, R. I., & Unnthorsson, R. (2024). Insect production: A circular economy strategy in Iceland. *Sustainability*, 16(20), 9063.
- Salazar, L. F., Müller, G., Querci, M., Zapata, J. L., & Owens, R. A. (2000). Potato yellow vein virus: its host range, distribution in South America and identification as a crinivirus transmitted by *Trialeurodes vaporariorum*. *Annals of Applied Biology*, 137(1), 7-19.
- Sallam, M. N., & Bothe, C. (1999). Chapter II insect damage: Damage on post-harvest. *Entomol. Res*, 53, 301-310.
- Sánchez-Bayo, F. (2021). Indirect effect of pesticides on insects and other arthropods. *Toxics*, 9(8), 177.
- Schebeck, M., Dowle, E. J., Schuler, H., Avtzis, D. N., Bertheau, C., Feder, J. L., ... & Stauffer, C. (2018). Pleistocene climate cycling and host plant association shaped the demographic history of the bark beetle *Pityogenes chalcographus*. *Scientific reports*, 8(1), 14207.
- Schowalter, T. D. (2000). Insects as regulators of ecosystem development. In *Invertebrates as webmasters in ecosystems* (pp. 99-114). Wallingford UK: CABI.
- Schowalter, T. D., Noriega, J. A., & Tschamtkke, T. (2018). Insect effects on ecosystem services—Introduction. *Basic and Applied Ecology*, 26, 1-7.
- Shekhar, C., Khosya, R., Thakur, K., Mahajan, D., Kumar, R., Kumar, S., & Sharma, A. K. (2024). A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and long-term human health impacts. *Toxicology Reports*, 101840.
- Siddiqui, S. A., Harahap, I. A., Osei-Owusu, J., Saikia, T., Wu, Y. S., Fernando, I., ... & Câmara, J. S. (2024). Bioconversion of organic waste by insects—A comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*, 187, 1-25.
- Simmons, T., Cross, P. A., Adlam, R. E., & Moffatt, C. (2010). The influence of insects on decomposition rate in buried and surface remains. *Journal of Forensic Sciences*, 55(4), 889-892.
- Singh, K., Kumar, S., Sharma, A. K., Jacob, S. S., RamVerma, M., Singh, N. K., ... & Ghosh, S. (2022). Economic impact of predominant ticks and tick-borne diseases on Indian dairy production systems. *Experimental parasitology*, 243, 108408.
- Singh, J., Kumar, D., Chauhan, S., Dhillon, H. K., Kumar, S., Kumar, V., & Kapoor, R. (2023). Role of omics approaches in vegetable breeding for insect pest resistance. *SN Applied Sciences*, 5(12), 364.
- Smith, M. R., Mueller, N. D., Springmann, M., Sulser, T. B., Garibaldi, L. A., Gerber, J., ... & Myers, S. S. (2022). Pollinator deficits, food consumption, and consequences for human health: a modeling study. *Environmental Health Perspectives*, 130(12), 127003.
- Stork, N. E. (2018). How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on Earth?. *Annual review of entomology*, 63(2018), 31-45.
- Strategy, U. B. (2018). A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment. *Eur. Comm.* [https://www.qualenergia.it/wp-content/uploads/2018/10/ec\\_bioeconomy\\_strategy\\_2018.pdf](https://www.qualenergia.it/wp-content/uploads/2018/10/ec_bioeconomy_strategy_2018.pdf)
- Tepper, K., Edwards, O., Sunna, A., Paulsen, I. T., & Maselko, M. (2024). Diverting organic waste from landfills via insect biomanufacturing using engineered black soldier flies (*Hermetia illucens*). *Communications Biology*, 7(1), 862.

- Thill, A., Cammaerts, M. C., & Balmori, A. (2024). Biological effects of electromagnetic fields on insects: a systematic review and meta-analysis. *Reviews on Environmental Health*, 39(4), 853-869.
- Tittonell, P., Hara, S. M., Alvarez, V. E., Aramayo, V. M., Bruzzone, O. A., Easdale, M. H., ... & El Mujtar, V. A. (2021). Ecosystem services and disservices associated with pastoral systems from Patagonia, Argentina—A review. *Cahiers Agricultures*, 30, 43.
- Truman, J. W. (2019). The evolution of insect metamorphosis. *Current Biology*, 29(23), R1252-R1268.
- Ulyshen, M., Urban-Mead, K. R., Dorey, J. B., & Rivers, J. W. (2023). Forests are critically important to global pollinator diversity and enhance pollination in adjacent crops. *Biological Reviews*, 98(4), 1118-1141.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022) World Population Prospects 2022: Summary of Results. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3.
- Van Huis, A.; Klunder, J.V.I.H.; Merten, E.; Halloran, A.; Vantomme, P. Edible insects. In *Future Prospects for Food and Feed Security*; Fao Forestry Papers; Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO): Rome, Italy, 2013.
- Van Huis, A., & Oonincx, D. G. (2017). The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5), 43.
- Venette, R. C., & Hutchison, W. D. (2021). Invasive insect species: Global challenges, strategies & opportunities. *Frontiers in insect Science*, 1, 650520.
- Verma, R. C., Waseem, M. A., Sharma, N., Bharathi, K., Singh, S., Anto Rashwin, A., ... & Singh, B. V. (2023). The role of insects in ecosystems, an in-depth review of entomological research. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 4340-4348.
- Wan, N. F., Fu, L., Dainese, M., Kiær, L. P., Hu, Y. Q., Xin, F., ... & Scherber, C. (2025). Pesticides have negative effects on non-target organisms. *Nature communications*, 16(1), 1360.
- Wunsch, N.-G. (2020). Estimated production volume of insect protein for food & feed in Europe 2028–2025. Online erişim: <https://www.statista.com/statistics/1148059/forecast-of-insect-protein-production-in-europe-food-and-feed> (Kasım 2025’de erişilmiştir)
- Wang, H., Rehman, K. U., Liu, X., Yang, Q., Zheng, L., Li, W., ... & Yu, Z. (2017). Insect biorefinery: a green approach for conversion of crop residues into biodiesel and protein. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 304.
- Williams, C.B. (1947). The field of research in preventive entomology. *Annals of Applied Biology*, 34:2, 175-85.
- Xu, F., Sun, J., Konda, N. M., Shi, J., Dutta, T., Scown, C. D., ... & Singh, S. (2016). Transforming biomass conversion with ionic liquids: process intensification and the development of a high-gravity, one-pot process for the production of cellulosic ethanol. *Energy & Environmental Science*, 9(3), 1042-1049.
- Zenni, R. D., Essl, F., García-Berthou, E., & McDermott, S. M. (2021). The economic costs of biological invasions around the world. *NeoBiota*, 67, 1.
- Zhao, Z., Hui, C., Peng, S., Yi, S., Li, Z., Reddy, G. V., & van Kleunen, M. (2023). The world’s 100 worst invasive alien insect species differ in their characteristics from related non-invasive species. *Journal of applied ecology*, 60(9), 1929-1938.
- Zhang, A., Liang, K., Yuan, L., Li, T., Jiang, D., & Yan, S. (2024). Insect adaptation: unveiling the physiology of digestion in challenging environments. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 11(1), 129.

# EKONOMİK - SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKLAŞIMLAR İLE METAL KİL ÜRETİMİ VE RENKLENDİRİLMESİ ÜZERİNE DENEYSEL UYGULAMALAR

Meltem Gürbüz<sup>1</sup>

---

## GİRİŞ

1990'larda Japonya'da geliştirilen metal kili başlangıçta gümüş ve altın killeri olmak üzere ilk Mitsubishi Metals Corporation ve Aida Chemical Industries tarafından üretildi. Mitsubishi Materials şirketi tarafından Japonya'da kurulan son teknoloji fabrikada mikroçiplerde kullanılmak üzere yüksek oranda rafine edilmiş altın üretmeye başlamışlardır. Konunun uzmanı olan Dr. Morikawa, üretilen bu altının diğer birçok teknolojiler de de (3 boyutlu baskıda, elektronik devrelerde, fotovoltaiik panellerde vb.) kullanılabileceği düşüncesinden yola çıkarak metal kilinin bulunmasındaki ilk adımı atmıştır. Gümüş ve bakır bazlı tozlar, yüksek iletkenlikleri nedeniyle bu uygulamalarda öncelikli olarak tercih edilir (Attarilar v.d 2020, Agrawal v.d 2019 Skarzyński v.d. 2021, Tran v.d. 2019). Mitsubishi Materials şirketi yaptığı araştırmalarda gümüş ve altından takı yapımında da bu buluşun kullanılacağını keşfetmiştir. (Hoshino, Kohno, & Morikawa ,1993). 2000'li yılların başından itibaren kuyumculuk sektöründe hızla yayılmaya başlayan metal kili neredeyse 5000 yıllık geçmişse sahip metal işleme tekniklerini bir kenara bırakarak tıpkı seramik kili gibi elle şekillendirme olanağı sunmaktadır (McCreight, 2006 sonra Yeşilmen, N.2018).

Metal kil, mikronize metal toz, bağlayıcı ve su karışımından oluşan belli proseslere göre pişirildiğinde saf metale dönüşen kil benzeri bir malzemedir. Fırında pişirildiğinde organik bağlayıcılar yanar ve geriye kalan ise saf metal bir üründür. Elle şekillendirilebilir, basit araçlar ile bir ip haline dönüştürülebilir veya bir yaprak olarak açılabilir. Metal Kil, ısıya dayanaklı (laboratuvarda üretilen taşların sentetik veya doğal) süstaşları, cam boncukları, seramikler porselenler ile pişirilebildiği için farklı malzemelerle kompozit bir formda kullanılabilir. Saf metal ile zorlu üretim süreci ve uzun süre gerektiren mücevher, süs eşyaları, içi boş ürünler ve heykel üretimleri metal kil ile çok daha kısa sürede kolaylıkla yapılabilir. Bu avantaja rağmen, metal killerin fiyatı metalin fiyatının yaklaşık 5 katı olduğu için fazla tercih edilmemektedir.

---

<sup>1</sup> Dr.Öğr.Üyesi, Mersin Üniversitesi, Takı Teknolojisi ve Tasarımı Yüksekokulu, ORCID ID: 0000-0003-2501-0697; e-mail: mgurbuz@mersin.edu.tr

Metal kilin düşük maliyetli üretimini amaçlayan bu çalışmanın ön literatür araştırmalarında, mikronize metal tozlarla organik bağlayıcılar ve sudan oluşan metal killerin bileşimleri için çalışmalarda çok farklı oranlar ve organik bağlayıcıların kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu oranların ve organik bağlayıcı türlerinin metal kilin dayanıklılığını, küçülme miktarlarını ve şekillendirme sırasında kuruma sürelerini etkilediği belirtilmektedir. Metal kilin plastite özelliği, sinterleşme sıcaklığı ve süreleri metale ve bağlayıcılara bağlı olarak değişmektedir. Fırınlama sonrasında metal kilin tam sinterleşmemesi dayanıksızlığı ve pul pul olması gibi sorunları doğurmaktadır. Günümüzde bu problemlerin bir kısmının giderildiği metal kil üretim prosesleri bulunmaktadır. Ancak hala metal üretimi için farklı alaşımlar, plastisite, dayanıklılık ve düşük maliyetli gibi iyileştirilmesi gereken yönler mevcuttur.

Bu çalışma kapsamında metal killin kullanılmasını arttırmak için daha az maliyetli metal kil üretim denemeleri yapılmıştır. Hazır alınan farklı boyut bronz bakır ve gümüş tozlar farklı oranlarda organik bağlayıcılar ile karıştırılarak yapılan denemelerde ideal olan şekillendirilebilir metal killer elde edilmiştir. Ancak maliyeti düşürme ve atık gümüşlerin değerlendirildiği sür düdürülebilir bir çalışma olması adına gümüşün çözülüp çökertilmesi sonucu daha ince boyutlarda gümüş tozu elde edilerek deneysel çalışmalar sonucunda ideal oranlarda organikler ile karıştırılarak plastite özelliği kazandırılmıştır. Ayrıca renkli metaller elde etmek içinde farklı oksitler ile denemeler yapılmıştır.

## YÖNTEM

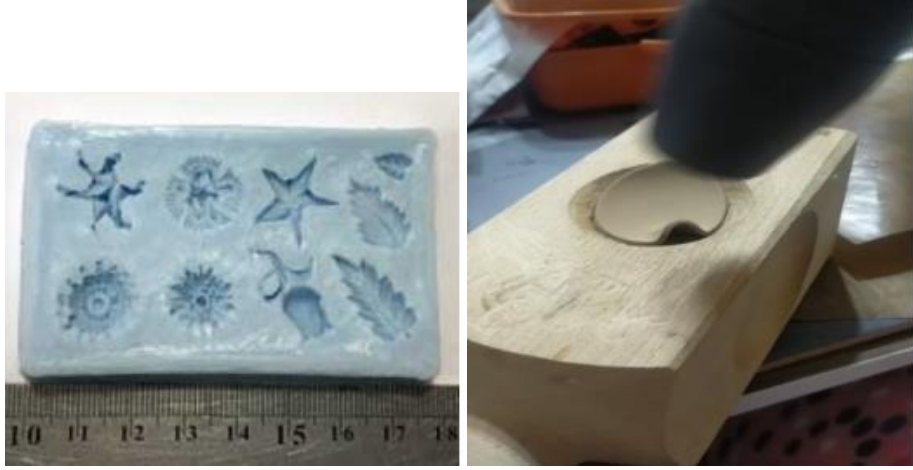
Metal kil üretimleri için Mikronize Bakır tozu, Mikronize Gümüş Tozu, Mikronize Bronz Tozu, Organik Bağlayıcı (arap zankı ) temin edilmiştir. Metil Selüloz, Askorbik Asit, Gliserin Farma, Nitrik Asit , Arap Zankı deneyler sırasında kullanılan malzemeler arasındadır (Şekil 1).



Şekil 1. Mikronize bakır tozu, mikronize gümüş toz, mikronize bronz tozu.

Daha sonradan karar verilen ve atık gümüşlerden asit ile çözme ve gümüşü çöktürerek saf gümüş elde etmek için ayrıca beher camlar (400 ml, 1000ml,

2000ml) karıştırmak için cam çubuklar, cam huni, süzgeç kağıdı, Bünzen Mesnedi laboratuvar stantı, bağlama parçası, huni halkası kullanılmıştır. Gerek hazır metal tozlar gerekse çözme çöktürme yöntemi ile elde edilen gümüş tozlar organik bağlayıcılar ve su ve yağ ile Streç filim arasında homejen olarak karıştırılarak oluşturulan metal killer silikon kalıplarda şekil verilip oda sıcaklığında fön ile kurularak önce 500 derecede biskuvit pişirim daha sonra 800-1000 derecede sinterleşme için ısının eşit yayılmasını sağlayan aktif karbon kömür içerisinde fırınlanmıştır (Şekil 2-3).



Şekil 2. Silikon kalıp (solda), kurutucu ile yapılan kurutma işlemi (sağda).



Şekil 3. Silikon kalıp (solda), kurutucu ile yapılan kurutma işlemi (sağda).

## BULGULAR

### 1. Hazır Metal Tozları ile Metal Kil Üretimi

Metal tozları ile ilk denemeler 3 gr 35 mikron bakır tozu ile gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcı madde olarak 0,3 gr nişasta ve 0,2 gr tatlı badem yağı karıştırılmış olup istenilen kile yakın bir karışım elde edilmeye çalışılmış ancak kıvam olarak biraz daha katılaşması gerektiğinden 1.2 gr daha bağlayıcı olarak nişasta eklenmiştir. Bu şekilde istenilen homojen kıvama yakın fakat elde edilen

maddenin moleküllerinin arasındaki bağların zayıf olduğu tespit edilmiştir. Aynı karışıma 0,6 gr daha bağlayıcı madde ve 1,2gr su eklenmiştir.. Daha sonra bir jelatin yardımıyla yapılan karışım yoğurulmaya çalışılmış olup, homojen ve ideal bir kıvam için 0,6 gr daha bağlayıcı ve 1gr su eklenerek elde edilen metal kil ile 1 mikron kalınlığında bir yıldız figürü yapılmış ve pişirilmiştir. Ürün pişirme sırasında kabarma gözlenmiş olup olumlu bir sonuç elde edilememiş, metal bağlayıcı ve su oranının daha kontrollü ve literatür de yer alan oranlara uygun çalışılması gerektiği ortaya çıkmıştır.



**Şekil 4. Mikron bakır tozu ile yapılan ilk denemelerde fazla konulan organik bağlayıcıların malzemelerin sinterleşmeye olan olumsuz etkisi.**

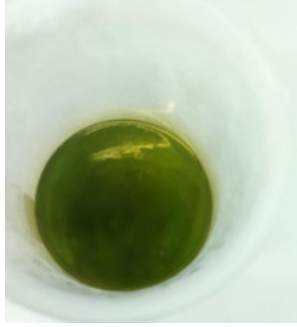
Birçok makale de ve patentlerde yer aldığı üzere metal tozu oranın yüzde 1 ile 4 ü arasında kullandığımız organik bağlayıcılar (arap zıncı ve Metilen selülöz) ile yapılan örneklerde olumlu sonuçlar elde edilmiştir.



**Şekil 5. Metal tozu oranının yüzde 1 ile 4 ü arasında kullandığımız organik bağlayıcılar (arap zıncı ve metilen selülöz) ile yapılan ve olumlu sonuçlar elde edilen metal kil üretimleri.**

## 2. Atık Gümüş Malzemelerin Çözdürülmesi İle Metal Kil Üretimi

Mersin Üniversitesi Takı Teknolojisi ve Tasarımı Yüksekokulu laboratuvarında yapılan çalışmalarda 800 mililitre nitrik asit içeren beher içerisinde yaklaşık 80 gram hurda gümüş metali eklenmiş ve 1 saat 30 dakika içerisinde gümüşün tamamen çözündüğü gözlenmiştir (Şekil 6).



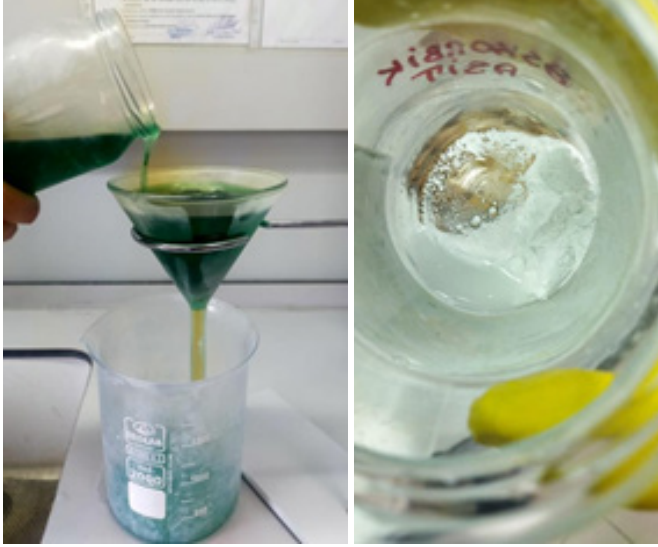
Şekil 6. Nitrik asit ile çözündürme işlemi

Çözeltilinin bir kısmı ultrasonik yıkama makinesine yerleştirilerek sıcaklık ayarı yapılarak içerisinde sulandırılmış askorbik asit ve metil selüloz sıvısı karıştırılarak eklendi (Şekil 7.).



Şekil 7. Ultrasonik yıkama makinesinde çöktürme işlemi

Gümüş parçaçıkları beher içerisinde alt kısımda toplandığı gözlemlendi, beherdeki asit kağıt filtre edilerek beherden uzaklaştırıldı. Beher içerisindeki gümüş tamamen asitten arındırılana kadar su ile yıkandı, beher içerisinde asit kalmadığından emin olununca beher içerisindeki gümüş küçük bir kavanoz içerisine alındı.



Şekil 8. Çöktürme işlemi sonrası gümüş parçaçıkları



Şekil 9. Gümüş klorür çökeltisi (solda) gümüş oksit çökeltisi (ortada) yıkama sonrası gümüş (sağda)

Gümüş kili elde etmek için, okside edilerek elde edilen gümüş tozu içerisine 1/10 oranında metil selüloz ve organik bağlayıcı eklenilerek ele yapışmaması için gliserin kullanılarak oluşturulan modeller pişirilmiş ve başarılı metal objeler yapılmıştır.



Şekil 10. Elde edilen gümüş metal kil ile uygulama

### 3. Metal Kilin Renklendirme Çalışmaları

Referans patentler incelenip verilen bilgiler dikkate alınarak bronz ve gümüş metal killer üretildi. Çeşitli miktarlarda parçalara bölünerek deneysel çalışmalara öncelikle 5 mikron bronz tozu ile hazırlanan metal killer ile başlandı.



Şekil 11. Bronz kil

Diğer örneklerde sırası ile bronz kil içerisine 1/10 demir oksit, mangan oksit, , kobalt oksit, krom oksit kullanılarak numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 12. Bronz metal kil ile demir oksit karışımı



Şekil 13. Mangan oksit ve kobalt oksit ile hazırlanmış bronz killer.



Şekil 14. Krom oksit ile hazırlanmış bronz kil.

Gliserin ile çözültülen kobalt, krom, demir, mangan v.b. oksitler yüzey boyası olarak pişirimi daha önce gerçekleştirilen bronz ve bakır killerin üzerine eklendi ve ilk kurutma işlemi sonrası renk aldığı gözlemlendi. İlk pişirim için 500 °C sıcaklığa daha önce çıkarılmış fırında 15 dakika süre ile fırındlandı.



Şekil 15. Kurutma işlemi sonrası.



Şekil 16. İlk pişirimi gerçekleştiren metal killer.

İlk pişirimi gerçekleştiren metal killer 800 °C de 1 saat pişirim için aktif karbon içerisine alınarak fırındı. Pişirimi gerçekleştiren metal killer soğuduktan sonra tel fırça ile temizlenerek kurutuldu. Gümüş klorür olarak hazırlanan metal killerde % 50 oranına varan küçülme meydana geldiği ve sinterleşmenin zayıf olduğu gözlemlendi.

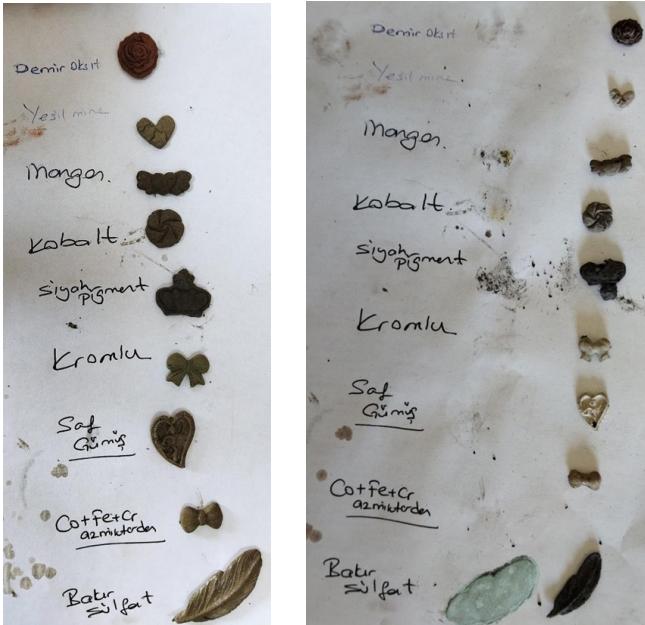


Şekil 17. Aktif karbondaki pişirimi gerçekleştiren metal killer.



Şekil 18. Pişirim sonrası metal killer

Gümüş oksit olarak kullanılan metal killer, gümüş klorür olarak kullanılan metal kilden daha iyi sonuç verdiği tespit edildi. Gümüş oksit tozu ile tekrar metal kil hazırlandı ve hazırlanan killere çeşitli oksitler eklenilerek numuneler hazırlandı (Resim 5.5.12). Hazırlanan numuneler önceden ısıtılmış fırında 15 dakika 500 °C de pişirildikten sonra aktif karbon içerisine alınarak 1 saat 850 de pişirildi. Ancak arzu edildiği gibi bir renk elde edilmediği gibi sinterleşmelerinde de olumsuz etkiler olduğu gözlemlendi.



Şekil 19. Oksitler ile hazırlanmış gümüş killer fırınlanmadan önce ve pişirim sonrası.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma da metal kil üreten firmalardan daha az maliyetli metal kil üretmek için hazır (5 mikron) gümüş, (35 ve 5 mikron) bronz ve bakır tozları alınarak, ağırlıkça %0.8 ila %8 oranında organik bağlayıcı olarak arap zıncı ve metilen selüloz ve ağırlıkça %0.1 ila 4 arasında da bebek yağı ve kıvam alana kadar su eklenerek kalıplanabilir kil karışımı elde edilmiştir.

Hazır satılan metal killerin üçte bir fiyatına elde edilen bu ürünlerin geneksel takı üretim yöntemlerine göre daha pratik hızlı ve değişik formlarda takı, heykel ve obje yapımında kullanılabilceği tespit edilmiştir.

Ayrıca sürdürülebilirlik adına atık metaller ile yapılan deneylerde nitrik asit ile hurda gümüş metallereinden oluşan takılar çözündürölüp gümüş nitrat sıvısı elde işleme başarı ile sonuçlandırılmıştır. Oluşturulan gümüş nitrat içerisinde gümüş çöktürme işleme sonrası gümüş klorür elde edilmiş, elde edilen gümüş klorür çöktürmesinden örnek alınarak geri kalan gümüş klorür tekrar sodyum hidroksit ile gümüş oksit çöktürmesi elde edilmiştir.

Elde edilen tozlar ile organik bağlayıcıların karışımı sonucu metal kili üretimi işleme başarılı sonuçlandırılmıştır. Üretimi gerçekleştirilen metal kiler araştırmada açıklanan miktar ve oranlarda metal oksitler ve refrakter pigmentler ile homojen bir şekilde karıştırılıp modellenmiştir. Modellemeler sırasında herhangi bir sorun tespit edilmemiş olup, iki aşamalı pişirim sürecine geçilmiştir.

Bu çalışma da başka bir deneysel çalışma da önceden temin edilmiş 5 mikron tane büyüklü olan bronz metal tozu ile metal kili üretimi ve metal oksitler ile karışım yapılarak renklendirilmiş modeller oluşturuldu. Pişirimler sonrası gümüş klorür ile hazırlanan metal kiler %50 boyutuna varan ölçüde küçölme ve metal yüzeyinde sinterleşmenin tam olarak gerçekleşmediği gözlemlendi. Gümüş oksit olarak kullanılan ve içerisinde herhangi bir oksit karışımı yapılmayan metal kilerde sinterleşme istenilen bir biçimde meydana geldi. 1/10 oranında krom oksit karışımı ile şekillendirilen metal kilerde sinterleşme sağlanamadı, oran düşürölldüğünde sinterleşme meydana geldi ve renk verme işleme gerçekleşti. Yeşil mine tozu ile hazırlanan metal kilerde sinterleşme kısmi olarak meydana geldi. Kobalt oksit ile hazırlanan metal kilerde sinterleşme meydana geldi, renklenme kısmi olarak gözlemlendi. Siyah pigment ile hazırlanan metal kilerde sinterleşme gerçekleşmedi. Krom oksit ile hazırlanan metal kilerde sinterleşme ve renklenme meydana geldi. Bakır sülfat ile hazırlanan metal kiler diğere killere göre daha fazla çekme meydana geldi, sinterleşme oldu fakat kısmi renklenme gözlemlendi.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Mersin Üniversitesi Hızlı destek araştırma projesi çalışması olarak Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2020-1-AP7-4091 numaralı proje ile desteklenmiş olup katkılarından dolayı BAP birimine teşekkür ederim.

Projenin gerçekleşmesinde, araştırmacı olarak görev alan Dr. Öğr. Üyesi Güven YARKADAŞ ve Yüksek Lisans öğrencisi İpek DEMİR e vermiş oldukları katkılardan dolayı teşekkür ederim.

## KAYNAKLAR

- Agrawal, R., Anantachaisilp, F., Tirano, J., Ramirez, H. Z., Marquez, Z., & Luhrs, C. (2019). Paste-based 3D printing of metallic materials: Effect of binders and precursor sizes. *Materials Research Express*, 6(10), 106561.
- Attarilar, S., Ebrahimi, M., Djavanroodi, F., Fu, Y., Wang, L., & Yang, J. (2020). 3D printing technologies in metallic implants: A thematic review on the techniques and procedures. *International Journal of Bioprinting*, 7(1), 306.
- Hoshino, K., Kohno, T., & Morikawa, M. (1993). Development of precious metals clay. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 40(8), 837–840.
- McCreight, T. (2006). *PMC Decade: The first ten years of precious metal clay*. Brynmorgen Press.
- Skarżyński, K., Krzemiński, J., Jakubowska, M., & Słoma, M. (2021). Highly conductive electronics circuits from aerosol jet printed silver inks. *Scientific Reports*, 11(1), 18141.
- Thongnopkun, P. (2012). Thermal behavior of nano-silver clay in the application of handmade jewelry. *Applied Surface Science*.
- Tran, T. Q., Chinnappan, A., Lee, J. K. Y., Loc, N. H., Tran, L. T., Wang, G., & Ramakrishna, S. (2019). 3D printing of highly pure copper. *Metals*, 9(7), 756.
- Yeşilmen, N. (2018). Takının tarihsel gelişim süreci ve 21. yüzyılda takı anlayışı: seramik-metal kili ile çağdaş takı yorumlamaları (Yüksek lisans tezi). Anadolu Üniversitesi.
- Mitsubishi Materials Corporation. (1994). Precious metal article... (US Patent No. 5376328).
- Aida Chemical Industries Co. Ltd. (1997). Clayish composition for molding shaped article... (US5702501A).
- Aida Chemical Industries Co. Ltd. (2001). Sinter of noble metal... (US6290744B1).

# ATIK DÖKÜM KUMUNUN BETONUN MEKANİK, MİKRO YAPISAL VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ: BİR DERLEME ÇALIŞMASI

Gökhan Ekincioglu<sup>1</sup>

## GİRİŞ

Son yıllarda, sürdürülebilir üretim ve imalat için iki önemli zorluk ortaya çıkmıştır: Karbondioksit emisyonlarının azaltılması (çimento endüstrisinin önemli bir katkısıyla) ve atık malzemelerin geri dönüştürülmesi (Mehta vd. 2020).

Küresel kullanımda sudan sonra ikinci sırada yer alan beton, tüm inşaat, yapı ve geliştirme projelerinin temelini oluşturan en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı'na (UNEP 2021) göre, 2015 yılında binaların tasarımı ve yönetimi, dünya çapında enerji kaynaklı karbondioksit ( $CO_2$ ) emisyonlarının %38'inden sorumluydu. Betonun temel bir bileşeni olan çimento üretimi, beton üretimindeki toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %95'inden sorumludur (Obla 2009). Betonun bileşiminde çimento (%10 hacim), ince agrega (%25 hacim) ve iri agrega (çakıl/kaya/taş, hacim %45) önemli rol oynar. İnşaat sektörü, bir ton çimento başına ortalama 6-10 ton agrega tüketmektedir. UNEP'in 2019 raporuna göre, küresel çimento üretimi 2017 yılında yıllık 4,1 milyar tona ulaşmış ve 2030 yılına kadar 4,83 milyar tona ulaşması tahmin edilmektedir (UNEP 2019). Betonun her bir temel bileşeninin farklı bir çevresel etkisi sonucunda betonun yaygın kullanımı çeşitli sürdürülebilirlik endişelerini gündeme getirmektedir.

Döküm endüstrisi, modern imalat sektörünün temel bileşenlerinden biri olup özellikle otomotiv, savunma, makine ve ağır sanayi alanlarında önemli bir paya sahiptir. Bu sektörün üretim hacmindeki artış, beraberinde yüksek miktarda atık döküm kumu oluşumunu getirmektedir. Metal döküm süreçlerinde kalıp ve maçaların hazırlanmasında yoğun olarak kullanılan silis kumu, belirli sayıda çevrimden sonra fiziksel ve kimyasal özelliklerini yitirerek atık hâline gelmektedir. Uluslararası literatürde, 1 ton döküm için yaklaşık 4–5 ton kum kullanıldığı ve bunun yaklaşık %20–30'unun her üretim çevriminde atığa dönüştüğü belirtilmektedir (Uçar, 2016). Türkiye'de de benzer üretim yapısı nedeniyle yıllık yüz binlerce ton atık döküm kumunun ortaya çıktığı

1 Doç. Dr. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman Meslek Yüksekokulu, ORCID ID: 0000-0001-9377-6817; e-mail: gekincioglu@ahievran.edu.tr

öngörülmektedir. Bu atığın büyük bölümü hâlâ düzenli depolama sahalarına yönlendirilmektedir. Döküm tesislerinin çoğunun organize sanayi bölgelerinde kümelenmiş olması, atıkların belirli noktalarda hızla birikmesine ve çevresel baskının artmasına neden olmaktadır (Balkaya, 2022).

Atık döküm kumunun düzenli depolama yoluyla bertaraf edilmesi, hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir olmayan bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Atığın yüksek hacmi, depolama alanı gereksinimini artırmaktadır. Atık haline gelen döküm kumları da silis, organik katkı maddeleri ve bentonit içermektedir ( Yalılı Kılıç ve Tüylü, 2019). İçeriğinde yer alan bentonit, kömür tozu, bağlayıcılar ve çeşitli katkıları nedeniyle yeraltı suyu ve toprak kirliliği riskini beraberinde getirmektedir.

Ancak atık döküm kumunun özellikle yüksek silis ( $\text{SiO}_2$ ) içeriği ile inşaat sektöründe ince agrega veya çimento benzeri katkı malzemesi olarak değerlendirilebilecek önemli bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle, atığın yapı malzemelerinde değerlendirilmesi, hem döngüsel ekonomi ilkeleri ile uyumlu bir yaklaşım ortaya koymakta hem de doğal kaynakların korunması açısından kritik bir fırsat sunmaktadır.

Son yıllarda beton üretiminden kaynaklı çevresel etkilerin azaltılması amacıyla gerçekleştirilen araştırmalar, atık döküm kumunun beton üretiminde ince agrega, kaba agrega ve kısmi çimento ikamesi olmak üzere farklı şekillerde kullanılabildiğini göstermiştir. Bu çalışmalar, malzemenin betonun işlenebilirliği, mekanik performansı, su geçirimsizliği, kimyasal dayanımı ve mikro yapısal gelişimine olan etkilerini bütüncül olarak değerlendirmektedir. Bununla birlikte, atık döküm kumunun özellikleri; döküm yöntemi, kullanılan bağlayıcı türü ve metal türüne bağlı olarak değişkenlik gösterebildiğinden, malzemenin beton içerisinde kullanımı konusunda standartlaştırılmış bir yaklaşım henüz tam olarak oluşmamıştır. Bu durum, farklı araştırma sonuçlarının karşılaştırılmasını güçleştirmekle birlikte, konuya ilişkin kapsamlı bir değerlendirme ihtiyacını da artırmaktadır.

Bu kitap bölümünde, atık döküm kumunun beton üretiminde kullanımına yönelik ulusal ve uluslararası literatür incelenmiştir.

### **ATIK DÖKÜM KUMU**

Döküm endüstrisi, metal parçaların üretiminde kalıp ve maça hazırlanmasında büyük oranda yüksek saflıkta silis kumuna ihtiyaç duyan bir üretim yapısına sahiptir. Döküm kumları, üretim sürecinde defalarca yeniden kullanılabilmelerine karşın, belirli bir çevrim sonrasında tane şekli bozulmakta veya fiziksel özellikleri zayıfladığı için kullanım dışı kalmaktadır. Kullanım ömrünü tamamlayan bu kum, atık döküm kumu (ADK) olarak adlandırılır.

Atık döküm kumu hem demir içeren hem de demir içermeyen metal döküm endüstrilerinin üretiminin bir yan ürünü olan yüksek kaliteli silika kumudur.

Yüksek ısı iletkenliği nedeniyle yüzyıllar boyunca kalıp döküm malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çeşitli döküm işlemleri için ham kum kullanılır ve özelliklerini geliştirmek için birkaç bağlayıcı ve katkı maddesi eklenir. Kullanılan bağlayıcı türüne göre, ADK iki kategoriye ayrılır: Bunlar; kil-bağlı (yeşil) kumlar ve kimyasal olarak bağlı kumlardır. İsimlerden de anlaşılacağı üzere, kil bağlı kum veya yeşil kum bağlayıcı olarak kilden oluşurken kimyasal olarak bağlı kumlarda bağlayıcı olarak kimyasallar kullanılır. Yeşil döküm kumu, döküm yüzeyinin son halini iyileştirmek için genellikle % 85-95 silis kumu, bağlayıcı olarak %4-10 bentonit kili, daha sonra %2-10 karbonlu katkı maddesinden oluşur (Eren, 2020).

Gelişen teknoloji ile hızlı üretimin sonucu olarak tüketim de artmakta ve buna bağlı olarak hammadde ve prosesler sonucu oluşan atık miktarlarında da artışlar görülmektedir (Yalılı Kılıç ve Tüylü, 2019). Dünya genelinde yılda milyonlarca ton atık döküm kumu ortaya çıkmakta olup, yalnızca ABD’de yıllık atık miktarının 6–10 milyon ton arasında değiştiği raporlanmaktadır. Türkiye’de ise düzenli bir envanter olmamakla birlikte, döküm sanayinin ölçeği dikkate alındığında yüzbinlerce tonluk bir atık oluşumu söz konusudur.

Çevresel açıdan bakıldığında, atık döküm kumunun doğrudan depolama sahalarına gönderilmesi sürdürülebilir bir yöntem değildir. Ayrıca bağlayıcı içerikleri nedeniyle hava, toprak ve yer altı suyu kirliliği riskinin ortaya çıkmasına da sebep olduğu/olacağı düşünülmektedir.

Endüstriyel simbiyoz yaklaşımı ile atık döküm kumunun inşaat sektöründe kullanımı hem çevresel sürdürülebilirlik açısından hem de doğal kaynak kullanımının azaltılması bakımından önemli bir fırsat sunmaktadır. Bununla birlikte, malzemenin heterojen yapısı ve döküm tesisleri arasındaki bileşim farklılıkları, standartlaştırılmış kullanım yöntemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, ADK’nın beton teknolojisindeki rolünün daha iyi anlaşılabilmesi için mineralojik özellikler, reaktif bileşim, bağlayıcı sistemlerle etkileşim ve uzun dönem dayanıklılık performansı gibi alanlarda daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

## **ATIK DÖKÜM KUMUN AGREGA OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR**

Atık döküm kumunun (ADK) beton üretiminde ince agrega yerine kullanılması hem sürdürülebilir kaynak yönetimi hem de doğal kum tüketiminin azaltılması açısından son yıllarda önem kazanan araştırma alanlarından biridir. Döküm proseslerinde yüksek sıcaklığa maruz kalan kumlar, kullanım ömürlerini tamamladıklarında fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişimler oluşmakta ve atık hâline gelmektedir. Silis oranı yüksek olan bu kumların betona ince agrega olarak kazandırılması, çevresel açıdan uygun bir geri kazanım yöntemi olmasının yanı sıra, betonun performans parametreleri üzerinde farklı etkiler

yaratmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, ADK'nın işlenebilirlik, birim hacim ağırlığı, su emme oranı, basınç dayanımı ve dayanıklılık özellikleri üzerinde belirgin sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir. Çoğu araştırma, belirli bir ikame oranına kadar ADK'nın betonun mekanik performansını kabul edilebilir düzeyde koruduğunu, bazı karışımlarda ise dayanımı artırabildiğini belirlenmiştir. Bu bölümde, ADK'nın ince agrega ikamesi olarak kullanımına ilişkin ulusal ve uluslararası çalışmalardan bazıları kronolojik olarak ele alınarak özetlenmiştir.

Khatib vd. (2010) atık döküm kumunun (ADK) ince agrega yerine %0, %30, %60 ve %100 oranlarında ikame edildiği betonların taze ve sertleşmiş özelliklerini incelemiştir. Tüm karışımlarda su/çimento oranı sabit tutmuşlardır. Dayanım, su emme, ultrasonik ses hızı (UPV) ve boy değişimi gibi sertleşmiş beton özellikleri 14, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonucunda değerlendirmişlerdir. ADK oranı arttıkça işlenebilirliğin azaldığını ve bunun ADK'nın doğal agregaya kıyasla daha büyük özgül yüzey alanından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Basınç dayanım ve UPV değerlerinin ADK artışıyla düşmesine rağmen, ince agreganın tamamen ADK ile değiştirilmesi durumunda dahi yeterli dayanım seviyelerine ulaşabildiğini tespit etmişlerdir.

Singh ve Siddique (2012) doğal kumu, ağırlıkça 0, %5, %10, %15 ve %20 oranında ADK ile değiştirilmiştir. ADK'li ve ADK'siz toplam beş beton karışım oranı (M-1, M-2, M-3, M-4 ve M-5) hazırlamışlardır. Betonun dayanım özelliklerini değerlendirmek için 7, 28 ve 91 günlük kür süreleri sonrasında basınç testi ve yarmada çekme dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, ince agrega yerine ADK'nın kısmen kullanılmasıyla şahit betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde marjinal bir artış olduğunu ortaya koymuşlardır.

Başar ve Deveci Aksoy (2012), atık döküm kumunun (ADK) hazır beton üretiminde ince agrega yerine belirli oranlarda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Deneysel çalışma kapsamında, kumun ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40'ı ADK ile değiştirilmiş ve tüm karışımlara solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) işlemi uygulanmıştır. Mekanik, sızıntı (leaching) ve mikroyapısal özelliklere ilişkin testler sonucunda, ADK ilavesinin basınç dayanımı ve yoğunluğu azalttığı, su emme oranını ise artırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, %20 ADK içeren beton karışımının kontrol numunesine oldukça yakın performans sergilediğini ortaya koymuşlardır.

Jadhav vd. (2017) doğal kumun atık döküm kumu (ADK) ile kısmen ikame edilmesiyle M20 ve M60 beton sınıflarında dayanım özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, ADK %0–30 aralığında beton karışımlarına dâhil edilmiş ve 7 ile 28 günlük kür süreleri sonucunda basınç ve eğilme dayanımlarını değerlendirmişlerdir. Her iki beton sınıfında da belirli oranlara kadar ADK ikamesinin basınç dayanımı,

eğilme dayanımı ve yoğunluğu artırabildiğini göstermiştir. Ayrıca çalışma ile sıva harçlarında doğal kumun %0–70 oranlarında ADK ile değiştirilmesini incelemiş ve IS 2250:1981 standardına göre hedeflenen 28 günlük 7.5 MPa basınç dayanımının uygun ikame oranlarında sağlanabildiğini ortaya koymuştur.

Torres vd. (2017) döküm atıklarını hem ince hem de kaba agrega yerine kütlece %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilerek üç farklı karışım grubu oluşturmuşlardır. 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonucunda basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü değerlerini belirlemişlerdir. Döküm atığının ince, kaba veya her ikisinin birlikte ikamesinde sırasıyla %30'a kadar ve %20'ye kadar birlikte kullanım durumlarında betonun mekanik performansını olumsuz etkilemediğini ortaya koymuşlardır. Döküm atıklarının betonda kullanımının hem geri dönüşüm oranlarını artırabileceği hem de doğal agrega ihtiyacını azaltarak sürdürülebilir malzeme yönetimine katkı sağlayabileceği belirtmişlerdir.

Aguiar vd. (2017) atık döküm kumunun ultra yüksek dayanımlı betonun (UYDB) hidrasyon reaktivitesine ve alkali-silika reaksiyonu (ASR) davranışını incelemişlerdir. ASR açısından reaktif ve reaktif olmayan agregalar kullanılarak iki UYDB karışım serisi hazırlanmış ve döküm kumunun hem hidrasyon hem de reaksiyon potansiyeline etkilerini değerlendirmişlerdir. Döküm kumunun hidrasyon reaktivitesini hafifçe artırdığını ve özellikle reaktif kum ile birlikte kullanıldığında %30'a kadar ikame oranlarında ASR eğilimini yükselttiğini belirlemişlerdir.

Çevik vd. (2017) Türkiye'deki bir çelik üreticisinden elde edilen atık döküm kumunun (ADK), doğal kumun kısmi ikamesi olarak çimento harçlarında kullanılabilirliğini araştırmış ve ADK'nın teknik açıdan geri kazanılabilir bir malzeme olup olmadığını değerlendirmiştir. Harç karışımları %15–60 oranlarında ADK içerecek şekilde hazırlanmış ve referans numuneyle karşılaştırılarak basınç dayanımları 3, 7 ve 28 günlük kürlerde ölçülmüşlerdir. Ölçümler sonucunda ikame oranı arttıkça dayanımın hafifçe azaldığını, ancak %15 ADK içeren harcın 3 ve 28 günlük dayanımlarda en yüksek performansı gösterdiğini ortaya koymuşlardır. SEM analizleri ile ADK partiküllerinin çimentolu matris içinde iyi bir şekilde gömülü olduğunu ve mikroyapı bütünlüğünün korunabildiğini göstermişlerdir. Çalışmanın sonunda ADK'nin çimento harcında doğal kum yerine yaklaşık %15 oranında etkili ve sürdürülebilir bir ikame malzemesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Prasad vd. (2018) artan çevresel sorunlar ve doğal agrega kaynaklarının aşırı tüketimi karşısında atık döküm kumunun (ADK) ince agrega yerine kullanımını incelemişlerdir. Çalışmada, M-kum içeren kontrol karışımı temel alınmış ve bu karışım, hem ham ADK hem de biyolojik olarak arıtılmış ADK

ile %10–50 oranlarında ikame edilmiştir. Tüm karışımların taze ve sertleşmiş beton özellikleri değerlendirilerek geleneksel betonla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ADK ilavesinin beton dayanımını belirli oranlara kadar artırdığını göstermiştir. Çalışmada özellikle artırılmış ADK'nin ince agreganın ikamesinde sürdürülebilir ve performans açısından uygulanabilir bir alternatif sunduğu ortaya konulmuştur.

Sandhu ve Siddique, R. (2019) Atık döküm kumunun (ADK) ince agreganın yerine kullanılmasının kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) taze, dayanım ve mikro yapısal özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Başlangıçta, kontrol amaçlı KYB tasarlanmış ve ardından ince agregalar hacimce %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ADK oranlarında karışımlar hazırlamışlardır. Çalışma sonunda ADK'nin KYB üretiminde kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Iloh vd. (2019) Güney Afrika'nın döküm endüstrisinden kaynaklanan atık döküm kumlarının (ADK) beton üretiminde ince agreganın yerine kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla beş farklı ADK örneğinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini incelemiştir. İncelenen numuneler arasında iki adet kil bağlı ve üç adet kimyasal bağlı kalıplama kumu bulunmakta olup, partikül boyutu dağılımı, özgül ağırlık, nem, kil içeriği ve LOI gibi özellikler kapsamlı şekilde analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda ADK'nin tane dağılımı açısından standart agrega gradasyon kriterlerini tam olarak karşılamadığını tespit etmişlerdir. Buna karşın XRF, XRD ve SEM/EDS analizleri, kumların kimyasal bileşimlerinin literatürde raporlanan uygunluk değerleriyle uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışma sonun da ADK'nin kimyasal özellikleri itibarıyla betonda doğal kum yerine kullanılabilecek nitelikte olduğu ve endüstriyel atıkların değerlendirilmesi açısından önemli bir potansiyel sunduğunu belirtmişlerdir.

Parashar vd. (2020) dünya genelinde büyük miktarlarda oluşan atık döküm kumunun (ADK) kendiliğinden yerleşen betonlarda (KYB) ince agreganın yerine kullanılabilirliğini araştırmışlardır. ADK, %0–40 oranlarında ince agreganın ile ikame edilerek işlenebilirlik, mekanik performans ve dayanıklılık özellikleri değerlendirmişlerdir. ADK oranına bağlı olarak KYB'nin işlenebilirlik davranışında belirgin değişimler ortaya çıktığını belirlemişlerdir. Doksan günlük kür süresi sonunda, %10 ADK içeren karışımların kontrol betonuna göre daha yüksek mekanik ve dayanıklılık performansı sergilediği; ancak bu oranın üzerindeki ikamelerde performans düşüşlerinin başladığı tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, ADK'nin segregasyonu azaltmada önemli bir katkı sunduğu ve %20'ye kadar olan ikame oranlarında temel performans kriterlerinin kabul edilebilir seviyede kaldığını belirtmişlerdir.

Bhardwaj, ve Kumar (2023) yüksek silika içeriğine sahip döküm endüstrisi atığı olan atık döküm kumunun (ADK), betonda ince agreganın yerine

kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışmada ADK kullanımının betonun fiziksel, mekanik, mikro yapısal ve dayanıklılık özelliklerinde meydana getirdiği değişimleri kapsamlı şekilde ortaya koymuşlardır.

Zheng vd. 2023, Atık döküm kumunun (ADK), doğal kumun yerine kullanıldığı betonlarda işlenebilirlik, mekanik performans ve dayanıklılık üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Çalışma ile farklı tür ve içeriklerdeki ADK'nın fiziksel ve kimyasal özelliklerini analiz ederek harç, beton ve kendiliğinden yerleşen beton uygulamalarındaki potansiyel kullanım alanlarını ortaya koymuşlardır. ADK içerisindeki kil, toz ve fenolik reçine gibi safsızlıkların performans düşüşlerinin temel nedenleri arasında olduğunu belirlenmişlerdir. Ayrıca dayanıklılık özelliklerine ilişkin çalışmaların sınırlı olması, ADK'nın sürdürülebilir beton üretimindeki rolünü daha iyi anlamak için gelecekte ele alınması gereken önemli bir araştırma boşluğunu vurgulamışlardır.

Karakaya Harmancı ve Soğancıoğlu (2023) endüstriyel faaliyetler sonucu artan atık döküm kumunun beton üretiminde alternatif bir bileşen olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmaların da atık döküm kumu %5, %10 ve %20 oranlarında doğal agregaya ile yer değiştirilerek üretilen beton örnekleri üzerinde SEM-EDS, FTIR, TGA, XRD ve basınç dayanımı deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizler, atık döküm kumu ilavesinin betonun kimyasal bileşimi ve mineralojik yapısında belirgin değişimler oluşturduğunu ortaya koyulmuştur. Bu değişimlerin basınç dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilerek atık döküm kumunun performans açısından uygun kullanım aralıkları belirlenmiştir. Atık döküm kumunun hem çevresel sürdürülebilirlik hem de agregaya tüketiminin azaltılması açısından beton üretiminde potansiyel bir katkı malzemesi olduğu gösterilmiştir.

García vd., 2024, atık döküm kumunun (ADK) betonda doğal kum yerine kullanılabilirliğini değerlendirmek için 58 araştırmayı kapsayan sistematik bir derleme hazırlamışlardır. ADK 'nın betonun dayanımını genellikle iyileştirdiğini ancak bunun uygun oranlarda kullanım ile mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada %20'ye kadar ikamenin avantaj sağladığını, daha yüksek oranlarda ise işlenebilirlik ve performansta düşüş yaşandığını belirtmişlerdir. Genel olarak araştırmada, ADK'nın sürdürülebilir beton üretiminde potansiyel bir alternatif agregaya olduğunu ancak optimum kullanım oranının kritik olduğunu vurgulanmıştır.

Anvitha vd. (2024) kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) taze ve sertleşmiş özelliklerini geliştirmek amacıyla doğal kumun atık döküm kumu (ADK) ile kısmi olarak ikame edilmesini ve çimentonun %10'luk kısmını metakaolin (MK) ile değiştirerek araştırmışlardır. KYB'nin titreşim gerektirmeden kendi ağırlığıyla yerleşme özelliği sayesinde, yüksek işlenebilirlik ve homojenlik sağladığı vurgulanmıştır. Deneysel çalışmalarda doğal kum, ağırlıkça %0,

%10, %15, %20 ve %25 oranlarında ADK ile değiştirilmiş; tüm karışımlarda sabit bir su/çimento oranı (0,43) ile %1 kimyasal katkı kullanılmıştır. Beton numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler sonucunda doğal kumun %10'a kadar ADK ile ikame edilmesinin KYB'nin dayanım özelliklerini artırdığını ortaya koymuşlardır.

Tangadagi, ve Ravichandran (2024) atık döküm kumunun (ADK) kendiliğinden yerleşen betonda (KYB) ince agrega yerine kullanılabilirliğini araştırarak malzemenin mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkisini değerlendirmişlerdir. Kimyasal olarak ( $H_2SO_4$ ) ve fiziksel yöntemlerle arındırılan ADK, %0–50 oranlarında M60 sınıfı KYB karışımlarında kullanılarak taze beton özelliklerini incelenmişlerdir. Deneysel bulgular, 7, 28 ve 90 günlük kürlerde yapılan basınç, eğilme ve yarmada çekme deneylerinde %30'a kadar ADK kullanımının mekanik performansı önemli ölçüde etkilemediğini ortaya koymuştur. Dayanıklılık deneylerinde (su emme, kimyasal etki ve klor iyonu penetrasyonu) da benzer şekilde %30 ikame oranına kadar kabul edilebilir elde etmişlerdir. Artırılmış ADK'nın KYB üretiminde ince agrega için sürdürülebilir ve çevresel açıdan avantajlı bir alternatif oluşturduğu, ayrıca beton yoğunluğunu azaltarak daha hafif ve çevre dostu bir yapı malzemesi ortaya çıkardığını ortaya koymuşlardır.

Kandasamy ve Arulselvan (2024) atık döküm kumunun (ADK) betonda ince agrega yerine sürdürülebilir bir alternatif olarak kullanılabilirliğini değerlendirerek çevresel etkilerin azaltılmasını hedeflemişlerdir. Mekanik ve mikroyapısal özellikler SEM, XRD ve FTIR analizleri aracılığıyla incelenmiş ve beton karışımlarında %10–100 aralığında ADK ikame oranlarını denemişlerdir. Çalışma sonunda %45 ikame oranının optimum olduğunu ve bu düzeyde basınç dayanımında %58, yarmada çekme dayanımında %48 ve eğilme dayanımında %43 artış sağlandığını ortaya koymuşlardır. SEM analizleri, bu oranlarda ADK kullanımının parçacıklar arası bağlanmayı güçlendirerek dayanım ve dayanıklılığı artırdığını belirlemişlerdir.

Ali vd. 2025, atık döküm kumu (ADK) ile uçucu kül, silis dumanı ve metakaolin gibi tamamlayıcı çimentolu malzemelerin birlikte kullanıldığı betonların mekanik, dayanıklılık ve ekonomik özelliklerini kapsamlı biçimde incelemişlerdir. Özellikle %20 ADK ikamesi ile 5% silis dumanı ve 10% metakaolin kullanımının betonun basınç dayanımında sırasıyla %17 ve %23'e varan artışlar elde etmişlerdir. ADK'nın ince taneli yapısının mikro-doldurma etkisi sayesinde betonun yoğunluğu ve UPV değerlerini artırdığı, buna bağlı olarak asit dayanımı da tüm karışımlarda belirgin şekilde iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Ekonomik analiz sonrasında, ADK ikamesinin beton maliyetini %3,27'ye kadar düşürdüğünü ve özellikle metakaolin içeren karışımlarda bu tasarrufun %5'e ulaştığını ortaya koymuşlardır.

## ATIK DÖKÜM KUMUNUN ÇİMENTO İKAMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Atık döküm kumunun (ADK) yalnızca ince agrega olarak değil, aynı zamanda çimento ikame malzemesi olarak da değerlendirilebilme potansiyeli son yıllarda dikkat çeken araştırma alanlarından biridir. Yüksek silis ( $\text{SiO}_2$ ) içeriği ve ince tane boyutu, ADK'nın belirli koşullarda puzolanik özellik gösterebileceğini ve çimentonun hidratasyon sürecine katkıda bulunabileceğini düşündürmektedir. Özellikle çimento üretiminin yüksek karbon ayak izi göz önünde bulundurulduğunda, ADK'nın bağlayıcı sistemlerde kısmi ikame olarak kullanılması hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik avantajlar bakımından önemli bir fırsat sunmaktadır. Ancak bu konu ile ilgili literatürde yapılan çalışmaların sınırlı sayıda olduğu gözlenmiştir. Konu ile ilgili çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. ADK'nın belirli oranlarda çimentoya ikame edilmesinin betonun mekanik dayanımı, hidratasyon ürünleri, mikroyapı gelişimi ve kimyasal dayanım üzerinde çeşitli etkiler yarattığını göstermektedir.

Makul ve Sokrai (2018) otomotiv motor parçalarının döküm sürecinden elde edilen ince atık döküm kumunun (İADK), beton üretiminde kısmi çimento ikamesi olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. İADK ikame oranının artmasıyla birim ağırlık ve başlangıç çökme değerleri azalırken, geç çökme ile başlangıç ve son priz sürelerinde artış gözlemlenmiştir. Mekanik performans açısından, İADK oranındaki artışın basınç ve yarmada çekme dayanımlarında ve 28 günlük elastisite modülünde hafif düşüşlere yol açtığı belirlenmiştir. Sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ve asit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ortamlarında gerçekleştirilen dayanıklılık testleri, İADK içeren betonların referans betona kıyasla daha düşük korozyon ve kütle kaybı sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, düşük su/bağlayıcı oranı ile daha yüksek İADK ikamesinin, kimyasal etkilere karşı performansı olumlu yönde etkilediği ifade edilmiştir.

Sebki vd. (2019) atık döküm kumunun (ADK) kendi kendine yerleşen betonlarda (KYB) hem çimento ikamesi hem de ince agrega yerine kullanım potansiyelini araştırmışlardır. ADK'nın dolgu etkisi oluşturarak betonun kompaklığını artırdığını ve kısmi çimento tasarrufu sağladığını ortaya koymuşlardır. Çimento yerine kullanım durumunda basınç dayanımı bir miktar azalsa da, %30'a kadar ADK içeren betonların 28 günlük dayanımının yaklaşık 30 MPa seviyesinde kaldığı belirlenmiştir. Kumun ADK ile kısmi ikamesinde düşük oranlarda akışkanlık azalırken, %30 ve üzeri ikame oranlarında ince malzeme etkisiyle akışkanlıkta iyileşme gözlemlenmiştir.

## SONUÇLAR

İncelenen kapsamlı literatür, atık döküm kumunun (ADK) hem agrega ikamesi hem de çimento ikamesi olarak kullanılabilirliğine ilişkin önemli bulgular ortaya koymaktadır. Agrega ikamesine yönelik çalışmalar incelendiğinde, farklı araştırmacıların %5–50 aralığında değişen ikame oranlarını test ettikleri belirlenmiştir. Özellikle %10–30 aralığında gerçekleştirilen ikame oranlarının mekanik performans açısından en uygun aralık olduğunu görülmüştür. Agrega ikamesine ilişkin çalışma sayısının oldukça yüksek olması, bu alanda daha fazla deneysel doğrulama yapıldığını ve uygulamaya geçirilme potansiyelinin daha olgunlaştığını göstermektedir. Bu çalışmaların büyük çoğunluğu, ADK'nın işlenebilirlikte sınırlı bir düşüşe yol açmasına rağmen, uygun oranlarda kullanıldığında betonun dayanım ve dayanıklılık performansının kabul edilebilir seviyede kaldığını vurgulamıştır.

Çimento ikamesine yönelik çalışmalar ise sayıca daha sınırlı olmakla birlikte, ADK'nın yüksek silis içeriği sayesinde belirli bir puzolanik etki gösterebildiğini ortaya koymaktadır. İncelenen araştırmalar, genellikle %10–20 aralığında çimento ikamesiyle olumlu veya nötr etkilerin elde edildiğini; bunun üzerindeki oranlarda ise hidrasyonda zayıflama, dayanım kaybı ve mikroyapısal boşluklu yapı oluşumu gibi olumsuzlukların belirginleştiğini göstermektedir. Çimento ikamesi üzerine yapılan çalışmaların daha az sayıda olması, bu alanda henüz standart bir yaklaşımın oluşmadığını ve yeni deneysel verilere ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, ADK'nın agrega yerine kullanımı hem çevresel hem de mekanik açıdan uygulanabilir bir seçenek olarak öne çıkmakta; çimento ikamesi olarak kullanımı ise daha sınırlı oranlarda ve kontrollü mineralojik karakterizasyona bağlı olarak değerlendirilebilmektedir. Bu kapsamda gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- (i) ADK'nın kimyasal ve mineralojik bileşiminin dökümhane bazında standardize edilmesine yönelik çalışmalar yapılmalıdır;
- (ii) Çimento ikamesi üzerine daha fazla deneysel araştırma gerçekleştirilerek optimum ikame oranları farklı dayanıklılık koşulları altında test edilmelidir;
- (iii) Agrega ve çimento ikamesinin birlikte kullanıldığı hibrit karışımların performansı detaylı şekilde incelenmelidir;
- (iv) Uzun dönem dayanıklılık, mikro yapı ve çevresel etki değerlendirmesini içeren bütüncül çalışmalar artırılmalıdır.

İncelenen literatür ışığında ADK beton üretiminde sürdürülebilir bir alternatif malzeme olup doğru oran ve yöntemlerle kullanıldığında neden olduğu çevresel etki değerlerinin azaltılmasının yanı sıra ekonomik açıdan da önemli katkılar kazandıracağı düşünülmektedir.

## KAYNAKÇA

- Aguayo, F., Torres, A., Talamini, T., & Whaley, K. (2017). Investigation into the heat of hydration and alkali silica reactivity of sustainable ultrahigh strength concrete with foundry sand. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017(1), 2096808.
- Ali, T., Qureshi, M. Z., Inam, I., Kahla, N. B., Ahmed, H., Ajwad, A., & Adnan, M. (2025). Sustainable concrete production through the integration of waste foundry sand, fly ash, silica fume and metakaolin. *Scientific Reports*, 15(1), 27512.
- Anvitha, P., Pooja, S., Bhargavi, M., Rizwana, M., Dinesh, P., & Siva Krishna, A. (2024). *Effect of partial replacement of cement with metakaolin and sand with foundry sand in self-compacting concrete*. *International Journal of Engineering Research and Science & Technology*, 20(2), 392–403. <https://doi.org/10.XXXX/ijerst.v20i2.xxx> [ijerst.org](http://ijerst.org)
- Basar, H. M., & Aksoy, N. D. (2012). The effect of waste foundry sand (ADK) as partial replacement of sand on the mechanical, leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 508-515.
- Bhardwaj, A., & Kumar, P. (2023). *Comprehensive review on utilization of waste foundry sand in construction materials*. *International Journal of Environmental Technology and Management*, XX, XX–XX. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2070778> Taylor & Francis Online
- Çevik, S., Mutuk, T., Oktay, B. M., & Demirbaş, A. K. (2017). Mechanical and microstructural characterization of cement mortars prepared by waste foundry sand (WFS). *Journal of the Australian Ceramic Society*, 53(2), 829-837.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Sektörel Atık Kılavuzları, Döküm Sektörü, web sayfası: [https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/Dokum\\_Sektoru\\_Kilavuzu.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/Dokum_Sektoru_Kilavuzu.pdf), erişim tarihi: 05/07/2021.
- Eren, Ş. (2020). Endüstriyel Atık Bazlı Jeopolimer Betonda Atık Döküm Kumunun Doğal Agregaya Yerine İkame Edilerek Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(3), 746-757.
- Garcia, G., Cabrera, R., Rolón, J., Pichardo, R., & Thomas, C. (2024). Systematic review on the use of waste foundry sand as a partial replacement of natural sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 430, 136460.
- Iloh, P., Fanourakis, G., & Ogra, A. (2019). Evaluation of physical and chemical properties of South African waste foundry sand (WFS) for concrete use. *Sustainability*, 11(1), 193.
- Jadhav, S. S., Tande, S. N., & Dubal, A. C. (2017). Beneficial reuse of waste foundry sand in concrete. *Int. J. Sci. Res. Publ*, 7(3), 74-95.
- Kandasamy, S., & Arulselvan, S. (2024). Sustainable enhancement of concrete performance through waste foundry sand: a comprehensive analysis of mechanical and microstructural properties. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 29, e20240251.
- Karakaya Harmancı, f., & Soğancıoğlu Kalem, M. (2023). Betonda Agregaya İle Yer Değiştirilen Atık Döküm Kumunun Sertleşmiş Betonun Kimyasal ve Mineralojik Yapısına ve Mekanik Dayanımına Olan Etkisi. *Duzce University Journal of Science & Technology*, 11(2).
- Khatib, J. M., Baig, S., Bougara, A., & Booth, C. (2010, June). Foundry sand utilisation in concrete production. In *Second International conference on sustainable construction materials and technologies* (Vol. 1, pp. 4507-1490). Università Politecnica delle Marche Home Ancona.
- Kılıç, M. Y., & Tüylü, M. (2019). Bursa'daki Atık Döküm Kumlarının Endüstriyel Simbiyoz İle Hazır Beton Üretiminde Ham Madde Olarak Kullanımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(1), 99-110.
- Makul, N., & Sokrai, P. (2018). Influences of fine waste foundry sand from the automobile engine-part casting process and water-cementitious ratio on the properties of concrete: A new approach to use of a partial cement replacement material. *Journal of building engineering*, 20, 544-558.
- Mehta, V. (2024). Sustainable approaches in concrete production: an in-depth review of waste foundry sand utilization and environmental considerations. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(16), 23435-23461.
- Obla KH (2009) What is Green Concrete?. *Indian Concr J*.

- Parashar, A., Aggarwal, P., Saini, B., Aggarwal, Y., & Bishnoi, S. (2020). Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, 251, 118875.
- Prasad, V. D., Reddy, B. V. V., & Prasad, P. (2018). Study on concrete containing waste foundry sand, fly ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 186, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.066> ScienceDirect
- Sandhu, R. K., & Siddique, R. (2019). Strength properties and microstructural analysis of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, 225, 371–383.
- Sebki, G., Safi, B., & Chahour, K. (2019). Recycling of Foundry Sand Wastes in Self-Compacting Mortars: Use as Cementitious Materials and Fine Aggregates. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 90(2).
- Singh, G., & Siddique, R. (2012). Effect of waste foundry sand (ADK) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. *Construction and building materials*, 26(1), 416–422.
- Tangadagi, R. B., & Ravichandran, P. T. (2024). Performance evaluation of self-compacting concrete prepared using waste foundry sand on engineering properties and life cycle assessment. *Recycling*, 9(3), 47.
- Torres, A., Bartlett, L., & Pilgrim, C. (2017). Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete. *Construction and building materials*, 135, 674–681.
- Uçar, A. (2016) Döküm esasları ve yöntemleri. Uçar Yayıncılık, İstanbul.
- UNEP (2019) Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources. United Nations
- Zheng, R., Wang, Y., Luo, D., Bao, J., Zhang, P., Qin, L., & Song, Q. (2023). Feasibility of waste foundry sand in high-strength self-compacting concrete and the effects of elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 402, 133075.

# ANADOLU'DAKİ OFİYOLİTLER İLE İLİŞKİLİ YEŞİL SÜSTAŞLARI

Zeynel Başbüyük<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

Anadolu, tektonik plakaların kesişim noktasında yer alan ve karmaşık jeolojik evrimi (özellikle Tetis Okyanusu'nun kapanması) sonucu oluşmuş, benzersiz bir jeolojik mozaiktir. Bu coğrafya, tektonik birliklerin (metamorfik masifler, magmatik ve volkanik kuşaklar) yanı sıra, eski okyanus kabuğunun ve üst mantonun kalıntılarını temsil eden, geniş ofiyolitik kuşaklarla karakterizedir. Metalik maden yatakları açısından olduğu kadar, çeşitli süstaşları ve değerli mineraller bakımından da olağanüstü bir zenginliğe sahiptir. Tarih öncesi çağlardan itibaren madencilik ve süstaşı kullanımının yoğun bir şekilde devam ettiği Anadolu, bu özellikleriyle yalnızca bir jeoloji laboratuvarı değil, aynı zamanda kültürel bir merkezidir (Ekincioglu vd., 2018).

Süstaşı, doğal kökenli (nadiren sentetik) mineral, kayaç ya da organik kökenli maddelerin (Kaydu Akbudak vd., 2021); estetik görünimleri (renk, saydamlık, parlaklık, desen), dayanıklılıkları (sertlik, kırılma direnci, kimyasal kararlılık) ve nadir bulunurlukları nedeniyle kesilip parlatılarak takı, süs eşyası, mimari kaplama ve benzeri dekoratif amaçlarla kullanılan özel bir malzeme grubunu ifade eder (Başbüyük vd., 2023). Bir taşın süstaşı olarak değerlendirilebilmesi için yalnızca güzel görünümlü olması yeterli olmayıp, aynı zamanda işlenebilir (kesim ve cilaya uygun), kullanım sırasında bozunmaya karşı dayanıklı ve ekonomik olarak da talep edilen bir hammadde olması gerekir (Candan vd., 2022). Bu nedenle süstaşları; mineralojik bileşim, oluşum koşulları, jeokimyasal özellikler ve kültürel-ekonomik değerleri birlikte ele alınarak değerlendirilen, jeoloji ile gemoloji disiplinlerinin ortak inceleme alanına giren özgün doğal kaynaklardır (Kaydu Akbudak vd., 2017).

## 2. OFİYOLİTLER VE SÜSTAŞI OLUŞUMU

Ofiyolitler, yer kabuğunun derinliklerinden yüzeye taşınmış ve genellikle serpentinit, peridotit, gabro ve bazalt gibi kayaçlardan oluşan karmaşık yapılarıdır. Bu kayalar, özellikle okyanus tabanının yayılması ve dalma-batma (subdüksiyon) süreçlerinde yaşanan hidrotermal alterasyon ve bölgesel metamorfizma koşulları altında, ticari değeri yüksek mineral oluşumlarına ev sahipliği yapar.

<sup>1</sup> Doç. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, ORCID ID: 0000-0003-2845-148X; e-mail: zbasibuyuk@ahievran.edu.tr

Yeşil renkli süstaşlarının büyük bir kısmı, bu ofiyolitik kayaların alterasyonu, yani serpentinizasyon ve metasomatizma süreçleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu jeokimyasal olaylar sırasında **krom (Cr)** ve **nikel (Ni)** gibi geçiş metalleri serbest kalarak, kuvars, kalsedon, garnet ve çeşitli silikatların kristal yapısına dahil olur. Sonuç olarak, yüksek gemolojik değere sahip krizopras, krom kalsedon, yeşil granat ve krom diyopsit gibi yeşil taşlar, ofiyolitik kayalar ve onlarla temas eden çevresel birimlerin çatlaklarında ve damarlarında kristalleşir.

## 2. 1. Yeşil Süstaşlarının Kimyasal ve Gemolojik Önemi

Yeşil ton, süstaşı dünyasında **bereket, yeniden doğuş ve doğa** ile ilişkilendirilen, kültürel ve ekonomik açıdan en değerli renklerden biridir. Bu rengin kaynağı, taşın kristal kafesindeki iz elementlerdir:

- **Krom ( $\text{Cr}^{3+}$ ), Nikel ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ve Vanadyum ( $\text{V}^{3+}$ ):** Zümrüt, tsavorit ve krizoprasın en yoğun ve saf yeşil tonlarının ana kaynağıdır. Konsantrasyonları arttıkça renk doygunluğu ve dolayısıyla taşın değeri artar.
- **Demir ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ):** Peridot ve bazı turmalinlerde yeşil rengi oluşturur.  $\text{Fe}^{2+}$  genellikle daha sarımsı,  $\text{Fe}^{3+}$  ise daha soğuk yeşil tonlara yol açar.
- **Bakır ( $\text{Cu}^{2+}$ ):** Malakit ve diyoptaz gibi minerallerde karakteristik parlak mavi-yeşil rengi verir.

Gemolojik değerlendirmede, bir taşın “**süstaşı**” olarak kabul edilmesi için güzellik, dayanıklılık ve nadirlik kriterlerinin yanı sıra, **Mohs sertliği** (günlük kullanıma uygunluk için) ve **renk kalitesi** (ton, açıklık ve doygunluk) hayati öneme sahiptir. Ofiyolitlerle ilişkili yeşil taşlar, bu kriterleri büyük ölçüde karşılayarak ulusal ve uluslararası pazarda önemli bir potansiyel barındırır.

## 3. ANADOLU’NUN JEODİNAMİK ÇERÇEVESİ VE OFİYOLİTLER İLE İLİŞKİLİ SÜSTAŞI POTANSİYELİ

Anadolu, Avrasya, Afrika ve Arap kıtalarının tektonik etkileşim bölgesi olarak, yoğun bir orojenik (dağ oluşumu) etkinliğe maruz kalmıştır (Gülşah vd., 2017). Bu jeodinamik konum, bölgenin mineral ve süstaşı zenginliğinin temelini oluşturur. Tektonik evrimin merkezinde, Neotetis Okyanusu’nun kapanması süreci yer alır; bu kapanma, okyanusal kabuğa ait ofiyolit bileşimli kayaçların, düşük açılı ters faylar (naplar) aracılığıyla kıtasal kabuk üzerine yerleşmesine yol açmıştır.

### 3.1. Anadolu Ofiyolit Kuşakları

Türkiye genelinde gözlenen bu ofiyolit yerleşimleri, bölgesel tektonik ve jeolojik özelliklerine göre üç ana kuşakta gruplandırılabilir (Juteau, 1980; Gülşah vd., 2017):

1. **Kuzey Ofiyolit Kuşağı:** Kuzey Anadolu’nun yapısal ve tektonik gelişiminde önemli rol oynar.

**2. Orta (Toros) Ofiyolit Kuşağı:** Batı ve Orta Toroslar boyunca geniş bir yayılıma sahiptir.

**3. Güney (Peri-Arap) Ofiyolit Kuşağı:** Arap Plakası ile Anadolu Plakası arasındaki sınırı belirler.

Bu ofiyolit kuşaklarının haritasal dağılımı, süstaşı aramaları için temel bir rehber niteliğindedir (Şekil 1).



Şekil 1: Türkiye'deki ofiyolitlerin dağılımı (Juteau, 1980; Gülşah vd., 2017).

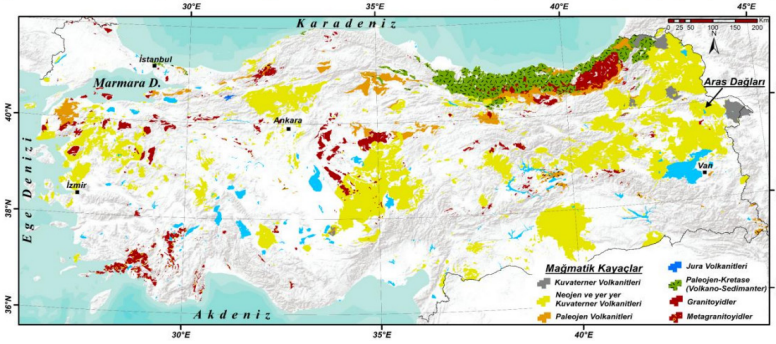
Bu jeodinamik süreç boyunca, ofiyolit yerleşimlerinin yanı sıra, Anadolu plakası içerisinde hem derinlik (plütonik) hem de yüzey (volkanik) magmatik kayalar geniş bir yayılım göstermiş, bu da hidrotermal sistemlerin aktivasyonu için gerekli ısı kaynağını sağlamıştır.

### 3.2. Ofiyolitik Kayalar ve Yeşil Süstaşı Oluşum Mekanizması

Anadolu'daki ofiyolit kuşakları, temel olarak ultramafik (harzburjit, dunit) ve mafik (gabro) kayalardan oluşur ve en önemlisi, bunların serpantinleşmiş türevlerini içerir. Bu kayalar, yeşil süstaşlarının oluşumu için gerekli olan mükemmel kimyasal ve fiziksel ortamı sağlar.

#### 3.2.1. Hidrotermal Süreçlerin Rolü

Yeşil renkli süstaşlarının oluşumu, genellikle magmatik kökenli veya magma tarafından ısıtılmış meteorik suların (hidrotermal sıvılar) ofiyolitik bileşimli kayalar içerisinde geçmesiyle tetiklenir. Bu süreçte, ofiyolitlerin ana minerallerinden serbest kalan silis (Si) ve renklendirici elementler olan Krom (Cr), Nikel (Ni), Demir (Fe) ve Bakır (Cu) ile zenginleşmiş sıvılar, çatlak ve boşluklarda çökerek silisik süstaşlarını oluşturur. Şekil 2'de Türkiye'deki magmatik kayaların dağılımı verilmiştir (Öztürk ve Zorer, 2025). Ofiyolitler ile komşu magmatik kayalar Anadolu'daki yeşil renkli süstaşı oluşumu potansiyeline sahip bölgeler olarak değerlendirilebilir.



Şekil 2: Türkiye’deki magmatik kayaçların dağılımı (Öztürk ve Zorer, 2025).

Serpantinleşmiş ultramafikler ve bu birimler içinde gelişen kromit ve manyetit cevherleşmeleri, süstaşı oluşumu için gerekli Cr, Ni ve Fe kaynaklarıdır. Bu alterasyon ortamlarında, değerli yeşil taşlar gelişebilir:

- **Serpantin** (Antigorit, Lizardit): Ofiyolitlerin temel alterasyon ürünüdür.
- **Nefrit** (Kalsiyum-Magnezyum silikat): Amfibol grubunun bir üyesi, yeşim taşının bir formudur.
- **Krizopras ve Kromlu Kalsedon**: Yüksek oranda Ni ve Cr içeren hidrotermal silis çözeltilerinin çökmesiyle oluşur.
- **Çeşitli Yeşil Taşlar**: Krom diyopsit, epidot, klorit ve aktinolit içeren metamorfik/hidrotermal kayaçlar (örneğin yeşil amfibolit, piroksenit).

Bu yeşil renkli jasperler ve kalsedonlar, bünyelerindeki Fe, Ni, Cr elementlerinin yanı sıra klorit, epidot ve aktinolit gibi yeşil silikat minerallerinin katkısıyla karakteristik renklerini kazanırlar. Anadolu, bu zengin jeodinamik ve jeokimyasal birleşimi sayesinde, yeşil süstaşlarının oluşumu için dünya çapında önemli bir potansiyele sahip bir coğrafyadır.

#### 4. ANADOLU OFİYOLİTLERİ İLE İLİŞKİLİ ÖNEMLİ YEŞİL SÜSTAŞLARI

Anadolu’daki yeşil renkli süstaşlarının büyük bir kısmı, magmatik kökenli ve/veya magma tarafından ısıtılmış meteorik sıvıların, hidrotermal süreçler sırasında ofiyolitik bileşimli kayaçlar içerisinde geçmesi sonucunda, silisçe doymuş ve aynı zamanda Cr, Ni, Fe ve Cu elementlerince zenginleşmiş sıvıların oluşturduğu silisik süstaşlarıdır. Anadolu bu süstaşlarının oluşumu için mükemmel birlikteliğe sahip bir coğrafyadır. Anadolu’daki yeşil renkli süstaşı oluşumları, hem ofiyolitik hemde magmatik kayaçların bir arada gözlemlendiği bölgelerde (Erzurum, Tokat, Kütahya, Malatya, Kütahya, Mersin, Afyon, Çanakkale, Elazığ, Muğla) bulunmaktadır.

##### 4.1. Serpantin Grubu ve Nefrit Benzeri Kayaçlar

Ofiyolitik kayaçların serpentinizasyonu, Anadolu’daki en yaygın yeşil süstaşı potansiyelini oluşturan jeokimyasal süreçtir. Bu süreç, yerkabuğundaki

ultramafik kayaların (olivin ve piroksenlerce zengin harzburjitler ve dunitler), düşük sıcaklık ve yüksek su aktivitesi koşulları altında hidrotermal alterasyonu sonucunda gerçekleşir. Anadolu'daki serpantin grubuna ait bu yeşil taşlar, düşük Mohs sertliklerine (genellikle 2.5–4) rağmen, lifli dokularının sağladığı yüksek dayanıklılık (kırılmaya karşı direnç) sayesinde yontulmaya ve oymacılığa uygun, önemli süstaşları ve yapı malzemeleri arasında yer alır. Serpantinitler süs ve yapısal elemanlar oluşturmak için tarihi süreç içerisinde kullanılmışlardır (Bingöl, 2019). Serpantinitler anıtlarda (örneğin Yunanistan, İtalya) yaygın biçimde kullanılmış olup, günümüz inşaatlarında da oldukça çok tercih edilmektedir (Meierding, 2005; Bingöl, 2019). Orta Çağlardan beri, Avrupa'da birçok saray, kilise ve katedralin yapımında serpantinit kullanılmıştır (Roma'daki Massima sarayı, Floransa'daki katedral, Venedik'teki San Marcos, Vatikan'daki Saint Peter Meydanı ve Kilisesi, İstanbul'da Ayasofya) (Bingöl, 2019).

#### 4.1.1 Serpantin Grubu Mineralleri

Serpantin grubu mineralleri (antigorit, lizardit, krizotil),  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$  genel kimyasal formülüne sahip, tabakalı-lifli yapıda, hidratlı magnezyum silikatlardır. Bu mineraller, metamorfik koşullara bağlı olarak farklı morfolojilerde bulunabilir:

- **Lizardit ve Antigorit:** Genellikle kompakt ve ince taneli yapılar oluşturur. Yüksek yoğunluk ve parlaklık gösteren bu formlar, genellikle mimari ve süsleme taşı olarak kullanılır.
- **Krizotil:** Lifli yapısıyla bilinir (asbest).

Bu minerallerin yoğunlaşarak oluşturduğu, **lifli-keçemsi** veya **kompakt dokulu** kayalar, kimi zaman **nefrit benzeri** bir görünüm kazanarak (özellikle yeşil tonları ve yüksek dayanımları nedeniyle) süstaşı olarak değerlendirilir. Gerçek nefrit ( $Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$ ) bir amfibol minerali olmasına rağmen, yüksek kaliteli serpantinitler, gemolojik olarak benzer fiziksel özellikler (dayanım ve sertlik) sunabilir.

#### 4.1.2 Hattuşa Yeşil Taşı Örneği

Anadolu'nun tarihsel ve kültürel süstaşı kullanımının en dikkat çekici örneklerinden biri, Hitit İmparatorluğu'nun başkenti **Hattuşa'daki Büyük Tapınak** içerisinde yer alan **Hattuşa Yeşil Taşı**'dır (Şekil 3).



Şekil 3: Hattuşa Yeşil Taşı ([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Hattusa\\_Green\\_Stone\\_%28cropped%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Hattusa_Green_Stone_%28cropped%29.jpg))

- **Tanımlama:** Mineralojik açıdan literatürde çoğunlukla **nefrit** veya **serpentinit** (özellikle **lizardit-antigorit bileşimi**) olarak yorumlanmaktadır.
- **Fiziksel Özellikler:** Yaklaşık 69 cm kenar uzunluğuna sahip kübik bir bloktur. Koyu yeşil – yaprak yeşili renk tonunda, yoğun, kompakt ve zayıf bantlı/lekeli bir doku sunar.
- **Gemolojik Yaklaşım:** Gösterdiği yüksek dayanım özellikleri, onu nefrit tanımına yaklaştırmaktadır.

Bu taşın kökeninin bölgedeki ofiyolitik birimlerden olma ihtimali yüksektir. Bu örnek, serpantinleşmiş ultramafik kayaların sadece endüstriyel değil, aynı zamanda **kültürel ve sanatsal değer** taşıyan süstaşlarına dönüşümünü net bir şekilde göstermektedir (Nogay, 2019).

#### 4.2. Silisli Yeşil Süstaşları: Kalsedon (Krom Kalsedon ve Krizopras), Jasper ve Opal oluşumları

Anadolu ofiyolitik kuşaklar, magmatik sokulumlar ve hidrotermal alterasyon zonlarıyla ilişkili en yaygın olarak gözlenen silisli yeşil süstaşlarına ev sahipliği yapmaktadır. Bu taşlar, ofiyolitik jeokimyasal ortamdan (özellikle Cr, Ni, Fe zenginliği) ve bölgesel volkanizmadan türeyen kompleks bir jeolojik mirasın ürünleridir. Silisli yeşil süstaşları,  $\text{SiO}_2$  bileşimine sahip mikrokristalin veya kriptokristalin kuvars türlerinin (kalsedon, jasper ve çört) ve opal oluşumlarının bünyelerine giren yeşil renk veren geçiş elementleri (Cr, Ni, Fe) veya yeşil silikat mineralleri (klorit, serpantin, epidot) ile birlikte bulunması sonucu oluşur.

Silisli süstaşları, kristal boyutu ve içerdiği safsızlıklara göre farklı isimler alır:

- **Kalsedon:** Lifli, radyal-sferulit veya bantlı dokular sunan kriptokristalin kuvars türüdür.
- **Jasper:** Yüksek oranda demir oksit/hidroksit ve kil minerali içeren, genellikle opak ve yoğun renkli bir kalsedon türüdür. Kırmızı, sarı veya

yeşil tonlarda olabilir; yeşil jasperlerde renk oluşumu genellikle  $Fe^{3+}$ , Cr veya ince taneli yeşil silikatların varlığından kaynaklanır.

- **Çört:** İnce taneli, çoğunlukla sedimanter kökenli (ancak hidrotermal kökenli de olabilir) mikrokristalin kuvars türüdür. Bantlı veya nodüler yapıda olabilir.
- **Opal:** Amorf yapıdaki camsı dokulu silisli süstaşıdır.

Anadolu'da ofiyolitlerle ilişkili bilinen en önemli süstaşı bölgeleri;

#### 4.2.1 Erzurum (Şenkaya krizoprası):

- **Konum ve Yapı:** Erzurum ilinin Şenkaya ilçesi yakınında bulunur. Mineralojik olarak, kriptokristalin kalsedon yapısındadır.
- **Renk Kaynağı:** Krizoprasın ayırt edici açık yeşilden elma yeşiline kadar değişen rengi, büyük ölçüde bünyesindeki Nikel (167-387 ppm) ve Co (12.57-74.78 ppm) içeriğinden kaynaklanır (Selim vd., 2022). Ni ve Co, ofiyolitlerde bol bulunan ultramafik kayaların serpantinleşmesi sırasında serbest kalarak hidrotermal çözeltilerle silis çökelim alanlarına taşınır.
- **Gemolojik Önemi:** Şenkaya krizoprası, gerek Mohs sertliği (5), gerekse parlak ve doygun yeşil rengiyle uluslararası piyasada tanınmasını sağlayan gemolojik ve jeokimyasal özelliklere sahiptir (Şekil 4).

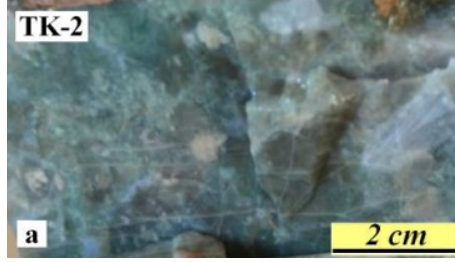


Şekil 4: Şenkaya krizoprası (Selim vd., 2022)

#### 4.2.2 Tokat (Artova Cr Kalsedon):

- **Konum ve Yapı:** Tokat ilinin Artova ilçesi yakınında bulunur. Mineralojik olarak, kriptokristalin-lifsi kalsedon yapısındadır.
- **Renk Kaynağı:** Krizoprasın açık yeşilden koyu yeşile kadar değişen rengi, büyük ölçüde bünyesindeki Krom (705 ppm) içeriğinden kaynaklanır (Başibüyük vd., 2020). Cr, bölgedeki ofiyolitlerde bol bulunan ultramafik kayaların serpantinleşmesi sırasında serbest kalarak hidrotermal çözeltilerle silis çökelim alanlarına taşınır.

- **Gemolojik Önemi:** Yüksek Mohs sertliği (yaklaşık 6.5-7) ve iyi cila alma özelliği (Şekil 5).



Şekil 5: Artova Cr Kalsedonu (Başibüyük vd., 2020)

#### 4.2.3 Tokat (Yeşil Opal):

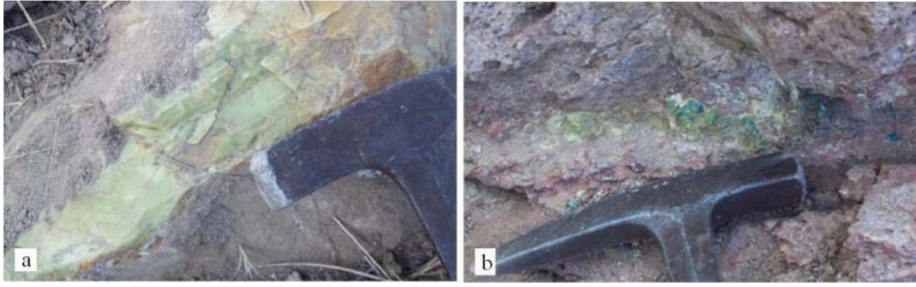
- **Konum ve Yapı:** Tokat ili. Mineralojik olarak, kriptokristalin-lifsi-amorf yapıdadır.
- **Renk Kaynağı:** Opalin yeşil rengi, büyük ölçüde bünyesindeki Krom içeren kil (Volkonskoit ve/veya Cr-montmorillonit) minerali içeriğinden kaynaklanır (Başibüyük vd., 2025).
- **Gemolojik Önemi:** Dolomit minerallerinden kaynaklı ağsı dokusu ve iyi cila alma özelliği (Şekil 6).



Şekil 6: Tokat Yeşil Opal (Başibüyük vd., 2025)

#### 4.2.4 Malatya (Yamadağ Yeşil Opal ve Krizokol):

- **Konum ve Yapı:** Malatya ili Arguvan ilçesi. Mineralojik olarak, kriptokristalin-lifsi-amorf yapıdadır.
- **Renk Kaynağı:** Opalin yeşil rengi, büyük ölçüde bünyesindeki V+Ni+Cu krizokolde ise Cu içeriğinden kaynaklanır (Kaydu Akbudak vd., 2018).
- **Gemolojik Önemi:** Rengi, dokusu ve iyi cila alma özelliği (Şekil 7).



Şekil 7: Malatya - Arguvan bölgesi opal a) ve krizokol b) oluşumları (Kaydu Akbudak vd., 2018)

#### 4.2.5 Kütahya (Seyitömer Opal):

- **Konum ve Yapı:** Kütahya ili Seyitömer ilçesi. Mineralojik olarak, kriptokristalin-lifsi-amorf yapıdadır.
- **Renk Kaynağı:** Bölgedeki opaller kırmızı, turuncu, kahverengi, yeşil, sarı ve beyaz renklerde bulunmaktadır. Opalin yeşil rengi, bünyesindeki Cr ve Ni içeriğinden kaynaklanır (Yanık vd., 2015).
- **Gemolojik Önemi:** Rengi, dokusu ve iyi cila alma özelliği.

Bu bölgelerdeki yeşil opal oluşumları her ne kadar volkanizma ile ilişkilendirilse de (Yanık vd., 2015), çevredeki ofiyolitik birimlerden gelen Cr ve Ni gibi elementlerin volkanik/hidrotermal silika çözeltilerine katılmasıyla zenginleşmiş olabilir. Bu durum, ofiyolitik jeokimyanın daha geniş alana yayılan silisli süstaşı oluşumlarını nasıl etkilediğini göstermektedir.

#### 4.2.6 Mersin (Yeşil Opal):

- **Konum ve Yapı:** Mersin ili. Mineralojik olarak, kriptokristalin-lifsi-amorf yapıdadır.
- **Renk Kaynağı:** Bölgedeki opaller Fındık karmaşığı olarak adlandırılan ofiyolitik melanj içerisindeki koyu yeşil ve siyah renkli serpantinitle içerisinde ikincil oluşumlar olarak yer almaktadır. (Gülbüz vd., 2018).
- **Gemolojik Önemi:** Rengi, dokusu ve iyi cila alma özelliği.

#### 4.2.7 Afyon (Bayat Opal):

- **Konum ve Yapı:** Afyon ili Bayat ilçesi. Mineralojik olarak, kriptokristalin-lifsi-amorf yapıdadır.
- **Renk Kaynağı:** Bölgedeki dendritli opallerin kimyasal analizine göre, turuncu rengin Fe, Mn ve Ti, yeşil rengin ise Ni ve Cr elementlerinden dolayı oluştuğu belirlenmiştir (Hatipoğlu ve Bozkurt, 2001).
- **Gemolojik Önemi:** Rengi, dokusu ve iyi cila alma özelliği (Şekil 8).



Şekil 8: Afyon-Bayat bölgesi dendritli opal oluşumları (Hatipoğlu ve Bozkurt, 2001)

#### 4.2.8 Çanakkale (Biga Krizopras):

- **Konum ve Yapı:** Çanakkale ilinin Biga ilçesi yakınında bulunur. Mineralojik olarak, kriptokristalin-lifsi kalsedon yapısındadır.
- **Renk Kaynağı:** Krizoprasın koyu yeşil rengi, büyük ölçüde bünyesindeki Nikel (4600) ve Krom (823 ppm) içeriğinden kaynaklanır (Ören, 2012). Ni ve Cr, bölgedeki ofiyolitlerde kayaçların serpantinleşmesi sırasında serbest kalarak hidrotermal çözeltilerle silis çökelim alanlarına taşınır.
- **Gemolojik Önemi:** Yüksek Mohs sertliği (yaklaşık 6.5–7) ve iyi cila alma özelliğine sahiptir (Şekil 9).

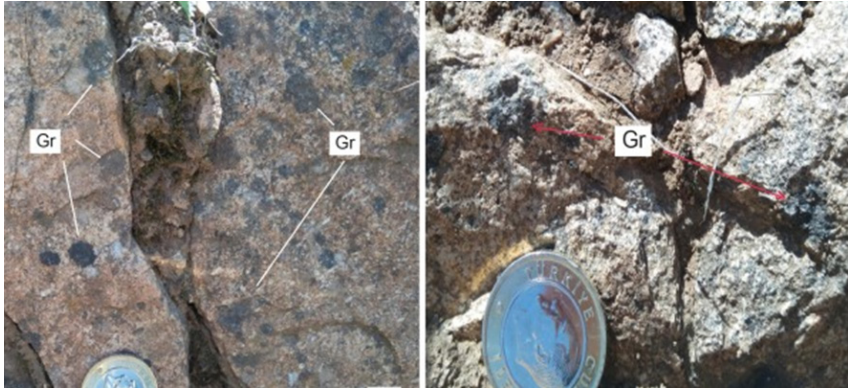


Şekil 9: Çanakkale - Biga Krizopras (Ören, 2012)

### 4.3. Diğer süstaşları

#### 4.3.1 Granat

Şaşmaz vd. (2023), Elazığ–Pertek yöresindeki granitoidlerde yaptıkları çalışmada, skarn zonlarında gelişen granatların kırmızımsı, yeşilimsi ve açık–koyu kahverengi tonlarda olduğunu ve boyutlarının yaklaşık 1–7 cm arasında değiştiğini, bu minerallerin hidrotermal sıvılar aracılığıyla kristalleştiğini belirtmektedir (Şekil 10). Bölgedeki yeşil renkli andradit ve uvarovit bileşimli granatların yüksek Cr içeriklerine sahip olduğu vurgulanmaktadır. Granitoidlerin Güney (Peri–Arap) Ofiyolit Kuşağı içerisinde yer alması ve özellikle yeşil granatlar içerisindeki Cr zenginleşmesi, bu mineralleri oluşturan hidrotermal sıvıların ofiyolitik kayaçlardan türeyen ya da onlardan jeokimyasal olarak etkilenen bir kaynakla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 10: Çalışma alanındaki yeşil granatların makro görüntüleri (Şaşmaz vd., 2023)

#### 4.3.2 Diaspor ve Yeşil “Zultanit”

Hatipoğlu ve Chamberlain, (2011) Muğla–Milas yöresinde yapmış oldukları çalışmada, Menderes Masifi’ne ait mermerler içerisinde yer alan metaboksit seviyelerini kesen hidrotermal olarak mineralize olmuş kırık zonlarında, benzeri az görülen, tek kristal formunda gelişmiş diaspor minerallerinin bulunduğunu belirlemişlerdir (Şekil 11). Araştırmacılar büyük diaspor kristallerinin yaklaşık %60’ı opak, soluk yeşil renkte olup, geri kalan kısmı gün ışığı ya da eşdeğer ışık koşullarında daha koyu zeytinyağı yeşili tonlarında, şeffaf özellik gösterdiğini söylemektedirler. Bazı kristallerin oldukça iri boyutlara ulaştığını; yaklaşık 500 g ağırlığında ve 7 cm’den uzun tek kristallerin nadir de olsa gözlenebildiğini, bu diaspor örnekleri üzerinde gerçekleştirilen EDS/SEM ve X-ışını floresans analizleri sonucunda, minerallerin ağırlıkça yaklaşık %1–1,5  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve eser miktarda krom (yaklaşık %0,057  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) içerdiğini belirlemişlerdir. Yazarlar bu Fe ve Cr içeriğinin, gün ışığında gözlenen sarımsı–yeşilimsi renk tonları ile renk değiştirme özelliğinin başlıca nedeni olduğunu düşünmektedir. Diaspor yatakları doğrudan ofiyolitik kayaçlarla ilişkili olmamakla birlikte, bölgedeki

Al ve Fe yönünden zengin alterasyon zonlarının, ofiyolit kökenli Cr ile zenginleşmiş olma olasılığı yüksektir (Kınacı ve Öztürk, 2023).

Krom, süstaşı niteliğindeki diasporun rengini kontrol eden kritik bir iz elementtir ve bölgesel ölçekte ofiyolitlerin yarattığı jeokimyasal ortam bu Cr kaynağının önemli bir bileşeni olabilir. Bu bulgular, Anadolu'daki ofiyolit-süstaşı ilişkisinin yalnızca doğrudan serpentinizasyon süreçleri ve silis çökelimi ile sınırlı olmadığını; aynı zamanda Cr, Ni ve Cu gibi elementlerin taşınımı yoluyla, çevredeki farklı jeolojik birimler içinde de yüksek değerli süstaşlarının oluşumunu teşvik eden daha geniş ölçekli bir jeokimyasal sistemin varlığına işaret etmektedir.



Şekil 11: Muğla – Milas bölgesindeki yeşil renkli diasporlar (Hatipoğlu ve Chamberlain, 2011)

## 5. SONUÇ

Anadolu, Neotetis Okyanusu'nun kapanmasına bağlı karmaşık tektonik evrimi, geniş ofiyolit kuşakları ve bunlarla ilişkili magmatik-hidrotermal sistemleri sayesinde yeşil renkli süstaşları açısından dünya ölçeğinde dikkat çekici bir potansiyele sahiptir. Kuzey, Orta (Toros) ve Güney (Peri-Arap) ofiyolit kuşaklarının jeodinamik konumu, hem ultramafik kayaların (harzburjit, dunit, serpantinit) doğrudan süstaşı kaynağı olarak değerlendirilmesini, hem de bu kayalardan türeyen Cr, Ni, Fe ve Cu zenginleşmiş hidrotermal akışkanların çevre birimler içerisinde silisli ve diğer minerallerden oluşan yeşil taşları oluşturmasını mümkün kılmaktadır.

Ofiyolitik kayaların serpantinleşmesi sonucu gelişen serpantinitler, nefrit benzeri kayalar ve Hattuşa Yeşil Taşı gibi tarihsel örnekler, Anadolu'da yeşil süstaşlarının yalnızca jeolojik değil aynı zamanda kültürel bir miras unsuru olduğuna işaret etmektedir. Serpantin grubu minerallerin (antigorit, lizardit, krizotil) oluşturduğu kompakt ve lifsi dokulu kayalar, yeterli dayanımları ve işlenebilirlikleri sayesinde hem mimari süs taşı hem de lapidari amaçlı kullanılabilecek önemli hammaddelerdir.

Silisli yeşil süstaşları (krizopras, krom kalsedon, yeşil opal, jasper vb.) bakımından Erzurum–Şenkaya, Tokat–Artova ve Tokat yeşil opali, Malatya–Yamadağ, Kütahya–Seyitömer, Mersin ve Afyon–Bayat gibi sahalar, ofiyolitik–magmatik sistemlerin kontrolündeki tipik örnek alanlar olarak öne çıkmaktadır. Bu alanlarda, ultramafik kayalarından türeyen Cr, Ni ve kısmen Fe ile Cu içeren hidrotermal silis çözeltileri çatlak ve boşluklarda çökerek gemolojik özellikleri güçlü, yüksek cila alma kapasitesine sahip, sertlik ve renk kalitesi bakımından uluslararası pazarda rekabet edebilecek nitelikte yeşil taşlar oluşturmuştur.

Elazığ–Pertek çevresindeki andradit/uvarovit bileşimli yeşil granatlar ve Muğla–Milas diaspor yatakları gibi doğrudan ofiyolit içinde yer almayan ancak ofiyolitlerden taşınan Cr ve diğer iz elementlerle renklenmiş süstaşları, Anadolu’daki ofiyolit–süstaşı ilişkisinin dolaylı etkilerini göstermektedir. Bu durum, ofiyolitlerin yalnızca kendi bünyelerindeki serpentin ve kromitli zonlar aracılığıyla değil, aynı zamanda bölgesel jeokimyasal çevreyi zenginleştirerek farklı litolojiler içinde de yüksek değerli süstaşlarının gelişimini tetiklediğini ortaya koymaktadır.

Bütün bu veriler, Anadolu ofiyolitleri ile ilişkili yeşil süstaşlarının; jeodinamik evrim ve hidrotermal sistemler ile yakından bağlantılı olduğunu, çok sayıda farklı mineral grubu (serpantin, nefrit benzeri kayalar, kalsedon türleri, opal, granat, diaspor vb.) üzerinde etkili bir jeokimyasal zenginleşme yarattığını, hem kültürel miras hem de doğal taş–süstaşı endüstrisi açısından stratejik bir kaynak potansiyeli taşıdığını ortaya koymaktadır.

Bu potansiyelin sürdürülebilir biçimde değerlendirilebilmesi için, ofiyolit kuşakları boyunca detaylı jeolojik–jeokimyasal haritalama çalışmalarının artırılması, süstaşı oluşumları için hedefli arama kriterlerinin (alterasyon tipleri, iz element içerikleri vb.) geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, seçilmiş sahaların jeoturizm ve jeomiras anlayışı ile değerlendirilmesi, Hattuşa Yeşil Taşı gibi tarihsel örnekler üzerinden “Anadolu yeşil taşları” kavramının ulusal ve uluslararası düzeyde tanıtılması, hem bilimsel hem de ekonomik getiriye artıracak önemli bir adım olacaktır.

Sonuç olarak, Anadolu’daki ofiyolitlerle ilişkili yeşil süstaşları; jeolojik, ekonomik ve kültürel boyutları bir arada düşünüldüğünde, yerel ve ulusal ölçekte katma değeri yüksek, özgün bir doğal kaynak grubunu temsil etmekte ve gelecekte yapılacak ayrıntılı çalışmalarla bu potansiyelin daha da netleşmesi ve ticarileşmesi beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

- Başıbüyük, Z., Kaydu Akbudak, I., Gürbüz, M. (2020). Mineralogical, geochemical and gemological investigation of Artova Ch-chalcedonies, Tokat–Turkey. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*, 77-92.
- Başıbüyük, Z., Gürbüz, M., Kaydu Akbudak, I., (2023). Surprise eggs, the miracle of nature: almus agates (Tokat-Türkiye). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*, 5-22.
- Başıbüyük, Z., Powolny, T., Kaydu Akbudak, İ., Dumańska-Słowik, M., Ekincioglu, G. (2025). The origin of opal-bearing listvenite from the Tokat Region (northern Turkey). *Mineralogical Magazine*, 1-57.
- Bingöl, A. F., 2019. Yeşil Doğal Taşlar. Mavi Gezegen Dergisi. Sayı 26, J.M.O. Yayını. Ankara
- Candan, E. O., Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük, Z., Ekincioglu, G. (2022). Tokat Nebiköy Kalsedonlarının Mineralojik-Petrografik ve Gemolojik İncelemesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 65(3), 287-296.
- Ekincioglu, G., Başıbüyük, Z., Gölbaş, A., Kaydu Akbudak, İ., (2018). Geçmişten Günümüze Doğaltaş Mozaik Sanatı ve Geleceğe Aktarılması. *International Journal of Interdisciplinary and Intercultural Art*, 3(4), 81-91.
- Gülşah, Ö., Akgül, M., Nurlu, N., Yapıcı, N. (2017). Guleman Ofiyoliti (Elazığ)’nin Jeokimyasal Özellikleri ve Tektonik Ortamı. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(2), 29-44.
- Gürbüz, M., Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük, Z. (2018). Mersin Kuzeyinde Yeralan Yeşil Opal Ve Agatların, Mineralojik - Gemolojik Özelliklerinin Araştırılması. In 71. Uluslararası Katılımlı Türkiye Jeoloji Kurultayı (Vol. 1, Issue 71, pp. 187–188).
- Hatipoğlu, M., Bozkurt, R. (2001). Süstaşı kalitesindeki Bayat (Afyon) Dendritli (Moss) opalinin mineralojik, gemolojik ve ekonomik incelemesi. In *May Conference: III. Marble Symposium (MERSEM)* (pp. 3-5).
- Hatipoğlu, M., and S. C. Chamberlain. 2011. A gem diaspore occurrence near Pınarcık, Mugla, Turkey. *Rocks & Minerals* 86 (3): 242–49.
- [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Hattusa\\_Green\\_Stone\\_%28cropped%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Hattusa_Green_Stone_%28cropped%29.jpg), 2025
- Juteau, T., (1980). Ophiolites of Turkey. *Ofioliti*, 2, 199-235.
- Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük, Z., Gürbüz, M. (2021). Silicified woods consist with malachite, azurite, and hematite in the Middle Eocene Çekerek Formation, Tokat—Turkey. *Lithology and Mineral Resources*, 56(6), 548-558.
- Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük, Z., Gürbüz, M., Önal, A. Ö., İşler, F. (2018). Yamadağ volkanitleri (Arguvan-Malatya) içerisinde silisli süstaşı oluşumları mineralojik, jeokimyasal, gemolojik özellikleri ve ekonomik önemleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1), 211-219.
- Kaydu Akbudak, İ., Gölbaş, A., Başıbüyük, Z. (2017). Kırşehir Müzesi Envanterinde Bulunan Yüzüklerin Arkeogemolojik Ve Jeoarkeolojik İncelemesi. *Journal of International Social Research*, 10(52).
- Kınacı, E., H., Ozturk, A. (2023). Gemological features of diaspore in sodra—Milas (mugla) region. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1145674.
- Meierding, T. C. 2005. Weathering of serpentine stone buildings in the Philadelphia, Pennsylvania region: A geographic approach related to acidic deposition. In: *Stone Decay in the Architectural Environment*. Geological Society of America, Special Paper, 390, 17–25.
- Nogay, G. (2019). Turkey: Big green mysterious stone lures tourists – Magical wish stone is located in Turkey’s Black Sea province of Çorum. *Anadolu Ajansı*.
- Ören, U. (2012). Gemmological and mineralogical investigations and genesis of the massive dark green chrysoprase from the Biga-Çanakkale region (Master’s thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey)).
- Öztürk, Y., Zorer, H. (2025). Aras Dağları’nın neotektonik gelişimi ve volkanik jeomorfolojisi (Doğu Anadolu). *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 23(2), 670-700.

- Selim, H. H., Güçtekin, A., Şahin, F., Kaya, M., Kaya, B., Güner, E., ... & Kantarceken, Y. (2022). Mineralogical, petrological, and geochemical characteristics of Şenkaya Chrysoprase, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 31(2), 193-207.
- Sasmaz, A., Kılıç, A. D., Akgul, B., Sasmaz, B. (2023). A spectral approach on mineralogy and geochemistry of garnet skarns in Arc-Type granitoids. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 286, 122037.
- Yanık, G., Hatipoğlu, M., Kibici, Y., Demirbilek, M., Özkul, C. (2015, May). The occurrence and genetical interpretation of the opal deposit around the Gevrekseydi (Seyitömer/Kütahya-Turkey). In *Proceedings of 9th International Industrial Minerals Symposium*.