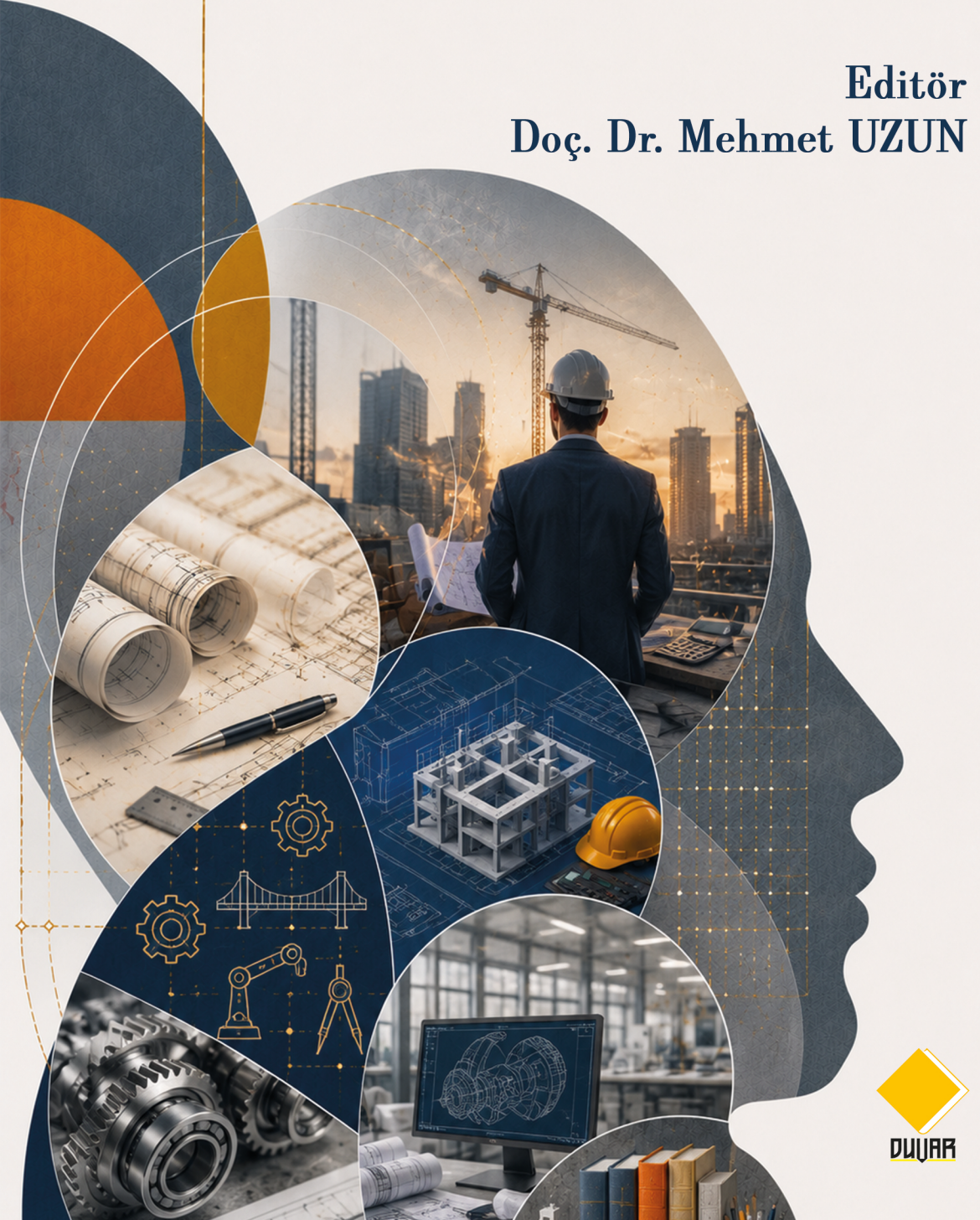


MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL PERSPEKTİFLER

Editör
Doç. Dr. Mehmet UZUN



MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL PERSPEKTİFLER

Editör

Doç. Dr. Mehmet UZUN



Mühendislikte Güncel Perspektifler

Editör

Doç. Dr. Mehmet UZUN

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Sayfa ve Kapak Tasarımı: Duvar DESIGN

Basım Tarihi: Temmuz 2026

Yayıncı Sertifika No: 49837

E-ISBN: 978-625-8936-32-2

© Duvar Yayınları

853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir. Yayınevi ve editörler sorumlu tutulamaz."

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm	1
Yüksek Entropili Alaşımlar: Temel Etkilerden Magnetron Sıçratma ile İnce Film Üretimine	
Ahmet Melik YILMAZ, Hikmet ÇİÇEK	
2. Bölüm	19
Değişken Hız Sürücülü (VSD) Kompresörlerin Enerji Tasarrufu Değerlendirmesi	
Emre TARGAY, Mustafa Tahir AKKOYUNLU	
3. Bölüm	38
Tarım Topraklarındaki Ağır Metal Kirliliğinin Potansiyel Ekolojik Riskinin Değerlendirilmesi	
Nevin KONAKCI	
4. Bölüm	55
Elmasın Mineralojik, Gemolojik Özellikleri, Oluşum Ortamları ve Osmanlı Cevahirnamelerindeki Yeri	
Nihal ÇEVİK	
5. Bölüm	69
Stratejik Ham Maddelerin Veri Analitiği Yaklaşımlarıyla İncelenmesi	
Şahika ERCAN, Elifcan GÖÇMEN POLAT	
6. Bölüm	87
Meteoritlerin Genel Sınıflandırılması	
Ceren KAMİL	

1. Bölüm

Yüksek Entropili Alaşımlar: Temel Etkilerden Magnetron Sıçratma ile İnce Film Üretimine

Ahmet Melik YILMAZ¹, Hikmet ÇİÇEK²

Özet

Yüksek entropili alaşımlar (HEA'lar), geleneksel alaşım tasarım anlayışından farklı olarak birden fazla ana elementin benzer atomik oranlarda bir araya getirilmesiyle geliştirilen ve son yıllarda malzeme bilimi alanında önemli ilgi gören ileri mühendislik malzemeleridir. Bu çalışmada, yüksek entropili alaşımların ortaya çıkışı, temel tasarım prensipleri ve geleneksel alaşımlardan ayrılan özellikleri ele alınmıştır. HEA'ların faz oluşumunu ve mikro yapısını belirleyen yüksek entropi, yavaş difüzyon, kafes bozulması ve kokteyl etkileri açıklanmış, bu etkilerin mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki rolleri değerlendirilmiştir. Ayrıca ergitme-döküm, mekanik alaşımlama ve toz metalurjisi gibi kütle üretim yöntemleri ile lazer kaplama, termal püskürtme, elektrokimyasal biriktirme ve magnetron sıçratma gibi kaplama ve ince film üretim teknikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Özellikle magnetron sıçratma yönteminde biriktirme mekanizması, proses parametrelerinin mikro yapı ve faz gelişimine etkileri ile reaktif gaz kullanımı sayesinde nitrür, oksit ve karbür esaslı yüksek entropili kaplamaların üretilme potansiyeli ele alınmıştır. Yüksek entropili alaşımların sahip olduğu geniş bileşim tasarım esnekliği ile uygun üretim yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi, uygulama gereksinimlerine uygun mikro yapı ve performans özelliklerinin elde edilmesinde belirleyici bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek entropili alaşımlar, Magnetron sıçratma, İnce film

¹ Dr., Erzurum Technical University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, ahmet.yilmaz56@erzurum.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2939-3592

² Prof. Dr., Erzurum Technical University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, hikmet.cicek@erzurum.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3038-4466

1. Giriş

Son yıllarda, benzersiz bileşim tasarımları, mikro yapıları ve ayarlanabilir özellikleri sayesinde yüksek entropili alaşımlar (HEA'lar) malzeme bilimi ve mühendisliği alanında önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Çoklu temel elementli, eş molar veya eş atomik oranlı alaşımlar olarak da adlandırılan HEA'lar, geleneksel alaşımlardan farklı olarak tek bir ana elemente dayanmamakta ve bu yönüyle alaşım tasarımında yeni bir paradigma sunmaktadır (Zhang et al., 2014). Geleneksel alaşımlar çoğunlukla demir, alüminyum veya titanyum gibi tek bir ana element esas alınarak geliştirilirken, bu yaklaşım bileşim serbestliğini sınırlamakta ve özgün mikro yapıların ortaya çıkmasını engellemektedir (W.-H. Wu et al., 2006).

1995 yılından itibaren geliştirilen HEA konsepti, bu sınırlamaları aşmayı hedeflemiş ve özellikle 2004 yılı sonrasında yoğun ilgi görmüştür. En az beş ana elementin %5–35 atomik oranlarda bir araya getirildiği HEA'lar, yüksek karıştırma entropisi sayesinde geleneksel alaşımların aksine karmaşık ve kırılğan intermetalik fazlar yerine, genellikle hacim merkezli kübik (HMK) veya yüzey merkezli kübik (YMK) gibi basit katı çözeltiler oluşturmaktadır (Yeh, 2013). Deneysel çalışmalar, yüksek entropinin faz sayısını azalttığını ve alaşımların yapısal kararlılığını artırdığını göstermektedir.

HEA'lar; yüksek entropi etkisi, yavaş difüzyon, kokteyl etkisi ve belirgin kafes bozulması gibi özgün mekanizmalar sayesinde yüksek mukavemet ve sertlik, üstün aşınma, korozyon ve oksidasyon direnci, yüksek sıcaklık kararlılığı ve iyi yorulma dayanımı gibi dikkat çekici özellikler sergilemektedir (P. Li et al., 2017; Tsai & Yeh, 2014). Bazı HEA'ların çökelme olmaksızın yüksek sıcaklıklarda kararlı kalabilmesi, bu alaşımların kullanım alanlarını daha da genişletmektedir.

Yüksek entropili alaşımlar; vakum ark ergitme, mekanik alaşımlama, toz metalurjisi gibi geleneksel yöntemlerin yanı sıra magnetron sıçratma, lazer kaplama, elektro kaplama ve termal püskürtme gibi modern kaplama teknikleriyle de üretilebilmektedir (Padamata et al., 2022; W.-H. Wu et al., 2006).

HEA'ların düşük ısı iletkenliği, atomik boyut ve kütle farklarından kaynaklanan elektron saçılmaları ile ilişkilendirilmekte ve bu özellik onları termal bariyer kaplamalar için uygun hale getirmektedir. Bunun yanı sıra, yüksek entropili kaplamaların antibakteriyel özellikleri, aşınma ve korozyon direnci ile birleştiğinde, günlük kullanım ürünlerinden endüstriyel ekipmanlara kadar geniş bir uygulama alanı sunmaktadır (W.-H. Wu et al., 2006). Üstün mekanik özellikleri ve hafiflik avantajları sayesinde HEA'lar, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde yüksek performans gerektiren yapısal bileşenler için önemli bir alternatif malzeme olarak öne çıkmaktadır (Ragunath et al., 2024).

2. HEA Kavramı ve Tanımı

Geleneksel alaşım tasarımında yaygın olarak benimsenen yaklaşım, istenen birincil özellikleri sağlamak üzere tek bir ana bileşenin sečilmesi ve ikincil özelliklerin geliştirilmesi amacıyla alaşım elementlerinin düşük oranlarda ilave edilmesine dayanmaktadır. Bu yöntem, nikel bazlı süperalaşımlar, paslanmaz çelikler, pirinçler ve refrakter malzemeler gibi mühendislik uygulamalarında başarıyla kullanılan çok sayıda alaşım sisteminin geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Cantor, 2014). Bununla birlikte, bu yaklaşım esas olarak bir veya en fazla iki ana bileşene dayalı sistemlere odaklandığından, eř atomlu ya da eř atomluya yakın çok bileşenli alaşımlar hakkında bilgi birikimi oldukça sınırlı kalmıştır.

Cantor, çok bileşenli faz diyagramlarının köşe ve kenar bölgelerinde yer alan alaşımların ayrıntılı biçimde incelenmiş olmasına karşın, diyagramın merkezinde bulunan ve çok daha geniş bir bileşim uzayını temsil eden alaşımlar hakkında yeterli bilginin bulunmadığını vurgulamıştır (Cantor et al., 2004). Faz diyagramının merkezinde yer alan bu geniş bileşim alanı göz önüne alındığında, geleneksel alaşımlama stratejisinin potansiyel malzemelerin yalnızca sınırlı bir kısmını kapsadığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle, çok bileşenli faz uzayının keşfedilebilmesi için ya alaşım elementlerinin sayısının ve miktarının artırılması ya da kimyasal olarak benzer elementlerin eş atomlu veya eş atomluya yakın oranlarda bir araya getirilmesi önerilmiştir. Bu yaklaşımların her ikisinin de alışılmışın dışında mikro yapılar ve özgün malzeme özellikleri ortaya çıkardığı gösterilmiştir (Cantor, 2014; Cantor et al., 2004).

Bu çerçevede, fiziksel metalurjide yeni bir alaşımlama paradigması olarak yüksek entropili alaşımlar ortaya çıkmıştır. HEA'lar, her biri genellikle %5–35 atomik oran aralığında bulunan en az beş ana elementten oluşan çok bileşenli katı çözeltili alaşımları olarak tanımlanmaktadır. Bu kavram ilk kez Yeh tarafından 1995 yılında ortaya atılmış, 2004 yılında ise Cantor tarafından eş atomlu çok bileşenli alaşımlar olarak sistematik biçimde tanımlanmıştır (Cantor et al., 2004; Yeh et al., 2004). Yapılan çalışmalar, bu tür alaşımların intermetalik fazlar yerine tek fazlı katı çözeltili yapıları oluşturma eğiliminde olduğunu ortaya koymuştur.

Yüksek entropi etkisi, bu davranışı açıklamak için temel bir kavram olarak öne çıkmaktadır. Yüksek entropi etkisi, çok sayıda elementin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan yüksek konfigürasyonel entropinin, alaşım sisteminde katı çözeltili fazlarını termodinamik olarak stabilize etmesi şeklinde tanımlanmaktadır (Yeh et al., 2004). Bu yaklaşım doğrultusunda, HEA'lar günümüzde birden fazla ana element içermesine rağmen basit kristal yapıya sahip hacim merkezli kübik (HMK) veya yüzey merkezli kübik (YMK) katı çözeltili fazları oluşturabilen alaşımlar olarak bilinmektedir. Bu alaşımlar; yüksek sertlik ve mukavemet, üstün

aşınma, oksidasyon ve korozyon direnci, iyi yorulma dayanımı ve yüksek termal kararlılık gibi özellikleriyle dikkat çekmektedir (Lin & Tsai, 2011; Senkov et al., 2011).

Geleneksel alaşım sistemlerinde katı çözelti oluşumu çoğunlukla Hume–Rothery kuralları ile açıklanırken, HEA’ların bu kurallara sıklıkla uymadığı görülmektedir. Farklı atomik yarıçaplara, kristal yapılara ve elektronegatiflik değerlerine sahip elementler içermelerine rağmen, yüksek karışım entropisi sayesinde HEA’larda basit katı çözelti fazları stabilize olabilmektedir. Bu durum, karışım entropisinin katı çözelti oluşumunda klasik metalurjide genellikle göz ardı edilen ancak HEA’lar için kritik bir rol oynayan bir parametre olduğunu göstermektedir (Zhang et al., 2014).

Termodinamiğe göre, Gibbs serbest enerjisi (G), faz kararlılığını kontrol eder ve şu şekilde yazılabilir; Termodinamik açıdan faz kararlılığı, Gibbs serbest enerjisi ile belirlenmekte olup bu enerji, entalpi ve entropi terimlerinin dengesiyle ifade edilmektedir. Çok bileşenli alaşımlarda sistem, Gibbs serbest enerjisini azaltmak için karışım entalpisini düşürmeye veya karışım entropisini artırmaya eğilimlidir. Yüksek sıcaklıklarda entropi teriminin baskın hale gelmesi, katı çözelti fazlarının oluşumunu teşvik etmektedir (Lucas et al., 2012; Zhang et al., 2014). Eş atomlu n bileşenli alaşımlarda karışım entropisi, element sayısı arttıkça yükselmekte ve bu durum HEA’larda katı çözelti fazlarının oluşma olasılığını önemli ölçüde artırmaktadır (Yeh et al., 2004).

Araştırmalar, yüksek entropili alaşımlarda oluşan faz sayısının, Gibbs faz kuralının öngördüğü maksimum değerden genellikle daha az olduğunu göstermektedir. Bunun temel nedenleri arasında yüksek karışım entropisinin karşılıklı çözünürlüğü artırması ve çok ana elementli yapının atom difüzyonunu yavaşlatarak faz oluşumunu kinetik olarak sınırlandırması yer almaktadır (Jin et al., 2019; Otto et al., 2013). Beş elementli eş atomlu bir alaşımda konfigürasyonel entropinin yaklaşık 1,61R değerine ulaşması, katı çözelti oluşumu için kabul edilen alt sınır olan 1,5R’nin aşılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, HEA’lar için ana element sayısının pratik olarak 5–13 aralığında olması önerilmektedir (Yeh et al., 2004).

Sonuç olarak, yüksek entropili alaşımlar; geleneksel alaşımlara kıyasla çok daha geniş bir bileşim uzayı, ayarlanabilir mikro yapı ve üstün mekanik–termal özellikler sunarak, malzeme tasarımında yeni ve güçlü bir yaklaşım ortaya koymaktadır (Murty et al., 2019; Praveen & Kim, 2018).

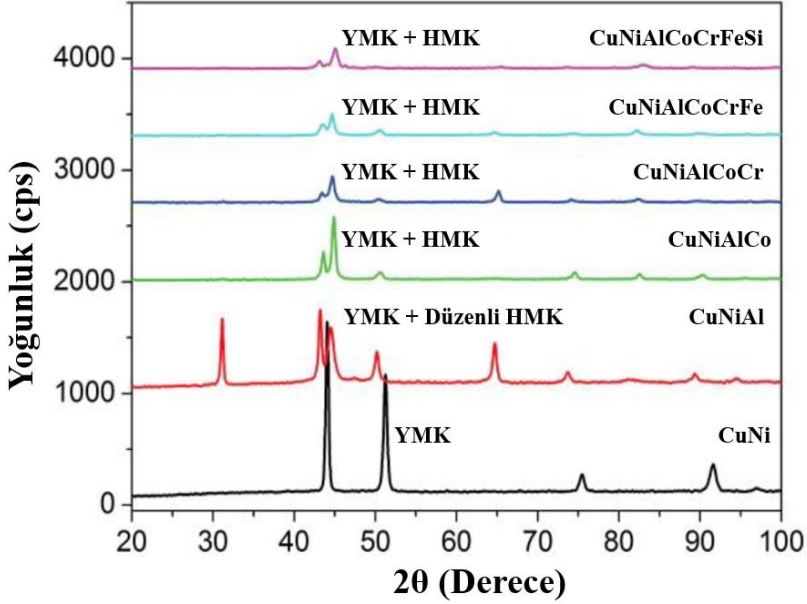
3. Temel Etkiler

Yüksek entropili alaşımların geleneksel alaşımlardan ayrılmasını sağlayan ve özgün mikro yapı–özellik ilişkilerinin temelini oluşturan dört ana etki

bulunmaktadır: yüksek entropi etkisi, yavaş difüzyon etkisi, kafes bozulma etkisi ve kokteyl etkisi. Bu etkiler birlikte değerlendirildiğinde, HEA'ların benzersiz faz kararlılığı ve üstün mekanik-fiziksel özellikleri açıklanabilmektedir.

3.1. Yüksek Entropi Etkisi

Yüksek entropi etkisi, çok sayıda ana elementin eş atomlu veya eş atomluya yakın oranlarda bir araya gelmesiyle ortaya çıkan yüksek konfigürasyonel entropinin, alaşım sisteminde katı çözelti fazlarını termodinamik olarak stabilize etmesi olarak tanımlanmaktadır. Artan karışım entropisi, Gibbs serbest enerjisini düşürerek intermetalik bileşiklerin oluşumunu baskılamakta ve genellikle HMK veya YMK gibi basit kristal yapılara sahip tek ya da az sayıda katı çözelti fazının oluşumunu teşvik etmektedir (Şekil 1). Bu etki, HEA'larda gözlenen sınırlı faz sayısının ve faz diyagramlarının merkezine yakın bileşimlerde dahi kararlı katı çözelti yapılarının oluşmasının temel nedenidir.

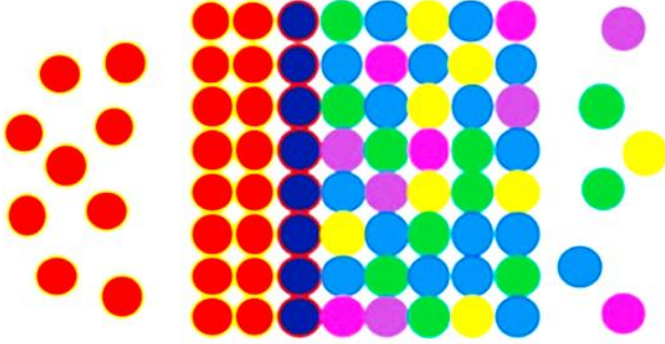


Şekil 1. Bir önceki yapıya bir element eklenmesiyle oluşturulan XRD desenleri (Tsai & Yeh, 2014).

3.2. Yavaş Difüzyon Etkisi

HEA'larda farklı atom türlerinin rastgele dağılımı ve düşük boşluk konsantrasyonu (Şekil 2), atomların yer değiştirmesini zorlaştırarak difüzyon hızını önemli ölçüde düşürmektedir. Yavaş difüzyon etkisi, yeni fazların oluşumunu ve tane büyümesini kinetik olarak sınırlandırmakta, mikro yapının yüksek sıcaklıklarda dahi kararlı kalmasını sağlamaktadır. Bu durum, HEA'larda

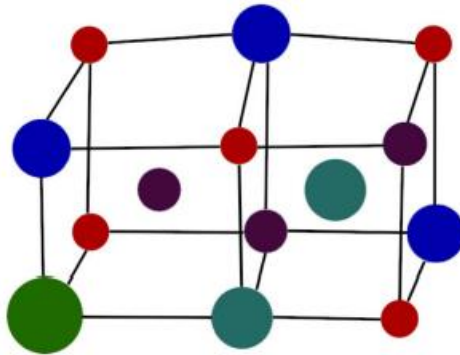
artmış sürünme direnci, daha yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı ve uzun süreli mekanik kararlılık gibi avantajlar sunmaktadır.



Şekil 2. Yavaş difüzyon etkisi şematik gösterimi (Kumar, 2023)

3.3. Kafes Bozulma Etkisi

Yüksek entropili alaşımlar, farklı atomik yarıçaplara ve bağlanma enerjilerine sahip çok sayıda element içerdiğinden, kristal kafeste şiddetli yerel bozulmalar meydana gelmektedir (Şekil 3). Büyük atomlar kafesi gererken küçük atomlar ek boşluklar oluşturarak önemli bir kafes gerilim enerjisine yol açmaktadır. Bu kafes bozulma etkisi, dislokasyon hareketini zorlaştırarak sertlik ve mukavemetin artmasına, buna karşın elektriksel ve ısı iletkenliğin azalmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla kafes bozulması, HEA'ların mekanik özelliklerinin temel belirleyicilerinden biridir.



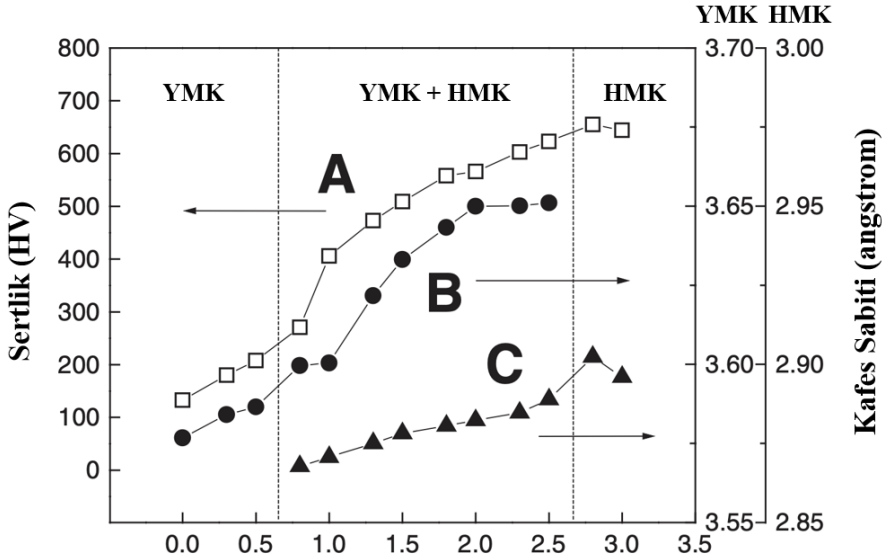
Şekil 3. Kafes bozulma etkisi şematik gösterimi (Dong et al., 2019)

3.4. Kokteyl Etkisi

Kokteyl etkisi, HEA'larda birden fazla elementin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan özelliklerin, tek tek bileşenlerin özelliklerinin basit bir toplamından çok

daha farklı ve çoğu zaman daha üstün olması durumunu ifade etmektedir. Alaşım bileşenlerinin türü, oranı ve karşılıklı etkileşimleri, faz yapısını, yoğunluğu, sertliği ve mekanik davranışı doğrudan etkilemektedir. Bu etki sayesinde HEA'lar, atomik ölçekte kompozit benzeri davranış sergileyebilmekte ve bileşimde yapılan küçük değişikliklerle mikro yapı ve özellikler geniş bir aralıkta ayarlanabilmektedir.

HMK yapısına sahip bileşenlerden oluşan yüksek entropili alaşımlar, genellikle yüksek mukavemet sergilemektedir. Alaşım bileşiminde yapılan değişiklikler, kristal yapı ve dolayısıyla mekanik özellikler üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi $Al_xCoCrCuFeNi$ yüksek entropili alaşımları üzerinde yapılan çalışmalar, alüminyum içeriğinin artmasıyla kristal yapının YMK'dan HMK + YMK yapısına ve nihayetinde tamamen HMK fazına dönüştüğünü ve bunun sertliği önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir (Yeh et al., 2004). Bu sonuçlar, alaşım bileşenlerinin yalnızca mikro yapıyı değil, aynı zamanda karşılıklı etkileşimleri yoluyla malzemenin genel davranışını da belirlediğini ortaya koymaktadır (Huang et al., 2004; J. M. Wu et al., 2006).



Şekil 4. Farklı x değerlerine sahip $Al_xCoCrCuFeNi$ alaşım sisteminin sertlik ve kafes sabitleri: A) $Al_xCoCrCuFeNi$ alaşımlarının sertliği, B) YMK fazının kafes sabiti, C) HMK fazının kafes sabiti.

4. Üretim Yöntemleri

Yüksek entropili alaşımlar, tek bir ana element etrafında kurgulanan klasik alaşım tasarımıyla farklı olarak, birden fazla ana elementi benzer atomik

oranlarda bir araya getirir. Amaç sadece entropiyi yükseltmek değildir. Asıl kazanım, çok elementli kimyanın sağladığı geniş tasarım alanı sayesinde faz kararlılığı, katı çözelti sertleşmesi, yavaş difüzyon, oksidasyon/korozyon dayanımı veya yüksek sıcaklık kararlılığı gibi özelliklerin birlikte ayarlanabilmesidir. Bununla birlikte HEA'larda nihai performans, yalnızca kimyasal bileşimle değil, seçilen üretim yöntemiyle ortaya çıkan mikro yapı (tane boyutu, kolonlu/yoğun morfoloji, amorf/nanokristalin oranı, segregasyon, iç gerilmeler) üzerinden belirlenir yani üretim yöntemi HEA tasarımının ayrılmaz bir parçasıdır (Yadav et al., 2025).

Üretim yöntemlerini pratikte iki ana hedefe göre sınıflamak işinizi kolaylaştırır:

Kütle/bulk HEA üretimi (ingot, çubuk, parça)

İnce film/kaplama üretimi (yüzey mühendisliği ve triboloji odaklı).

Kaplama ve ince filmler, pahalı elementlerin kullanımını azaltması, altlık malzemeyi çekirdek olarak korurken yüzeye HEA fonksiyonu kazandırması ve proses parametreleriyle mikro yapıyı daha ince ayarlayabilmesi nedeniyle literatürde oldukça güçlü bir yere sahiptir (Meghwal et al., 2020; Patel, Alidokht, et al., 2022; Zhou et al., 2019).

4.1. Kütle (Bulk) HEA Üretimi

Bulk HEA üretiminde en yaygın yaklaşım, sıvı hâl prosesleriyle ergitme–döküm hattıdır. Vakum ark ergitme veya indüksiyon ergitme ile elementler eritilir, ardından kalıba dökülerek ingot/çubuk elde edilir. Ark ergitmenin en büyük avantajı, çok yüksek sıcaklıklara çıkabilmesi ve yüksek ergime sıcaklıklı elementleri (özellikle refrakter sistemlerde) daha rahat eritebilmesidir. Bu nedenle literatürde bulk HEA çalışmalarının önemli bir kısmında ark ergitme baskın yöntem olarak görülmektedir (Han et al., 2018; Patel, Roy, et al., 2022).

Buna karşın çok elementli sistemlerde her element aynı şekilde karışır ve aynı şekilde katılaşır varsayımı çoğu zaman bozulur. Katılaşma sırasında dendritik ayrışma, elementlerin farklı erime sıcaklıkları ve farklı yoğunlukları nedeniyle makrosegregasyon, hatta düşük ergime noktalı elementlerde buharlaşma gibi riskler ortaya çıkabilir. Bu nedenle bulk üretimde tekrar ergitme, homojenleştirme tavı, sıcak şekillendirme (dövme/haddeleme) gibi adımlar çoğu zaman sürecin doğal uzantısı hâline gelmektedir (Komal et al., 2024; Zhang et al., 2014).

Sıvı hâl üretime alternatif olarak katı hâl prosesleri özellikle mekanik alaşımlama (MA) ve onu izleyen sinterleme HEA dünyasında ciddi bir yer

tutmaktadır. Yüksek enerjili bilyeli öğütme ile element tozları tekrarlı soğuk kaynak kırılma döngüleriyle atomik ölçekte karıştırılır, bu süreç nanokristalin veya çok ince taneli başlangıç yapıları üretmeye uygundur. Ardından kıvılcım plazma sinterleme gibi hızlı sinterleme yöntemleriyle yoğun bir bulk yapı elde edilebilir. Katı hâl yaklaşımının cazibesi, bazı sistemlerde ergitme dökümde görülen segregasyonu azaltma potansiyeli ve mikro yapıyı daha ince taneli tutabilmesidir. Buna karşılık toz kontaminasyonu/oksitlenme ve proses parametrelerinin hassasiyeti gerçek bir mühendislik problemidir (Onawale et al., 2021; Ramanathan et al., 2019).

Refrakter HEA’larda (RHEA) üretim daha da zorlaşır çünkü hedeflenen yüksek sıcaklık dayanımı, beraberinde yüksek ergime sıcaklıkları ve sınırlı süneklik gibi zorluklar getirmektedir. Bu sınıfta hem vakum ark ergitme hem de toz metalurjisi tabanlı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ayrıca mikro yapı stabilitesi (yüksek sıcaklıkta tane büyümesi, faz dönüşümü) kritik olduğu için üretim sonrası ısıt işlemler ve kompozisyon optimizasyonu daha belirleyici olmaktadır (Han et al., 2018).

4.2. Kaplama ve İnce Film Üretim Yöntemleri

HEA kaplamalar, çoğu zaman tribolojik amaçlarla, korozyon/oksidasyon dayanımı veya özel yüzey fonksiyonları için geliştirilir. Kaplamada temel mesele, altlıkla ne kadar güçlü bir bağlanma istendiği ve hedeflenen kaplama kalınlığının ne olduğudur. Çünkü her yöntem kalınlık, bağ mekanizması ve mikro yapı açısından farklı bir sonuç meydana getirmektedir (Luo et al., 2022).

Lazer kaplama, kalın ve metalürjik bağlı tabakalar üretmesiyle öne çıkmaktadır. Yüksek ısıtma/soğutma hızları, bir yandan segregasyonu sınırlayıp daha uniform yapıları destekleyebilirken diğer yandan altlığın kısmen erimesi nedeniyle seyrelme kaçınılmaz hâle gelir ve kaplamanın gerçek bileşimi altlık elementleriyle kayabilir. Bu yüzden lazer kaplamada seyreltme oranının kontrolü, HEA’larda özellikle kritiktir. Literatürde uygun seyreltme oranının düşük tutulması gerektiği vurgulanmaktadır (Cai et al., 2018; Yue et al., 2014).

Termal sprey yöntemleri büyük alanlarda hızlı kaplama üretmek için avantajlıdır ancak lamelli yapı, oksitlenme, gözenek ve ara yüzey kusurları gibi tipik termal sprey problemleri HEA kaplamalarda da karşılaşılmaktadır. Yine de maliyet/ölçeklenebilirlik dengesi nedeniyle endüstriyel ilgisi yüksektir (Meghwal et al., 2020; Qiu & Liu, 2013).

Elektrokimyasal biriktirme ise düşük sıcaklık ve düşük enerji tüketimiyle, karmaşık geometriler üzerinde bile film üretme avantajı sunmaktadır. Buna rağmen HEA tarafında farklı elementlerin indirgenme potansiyellerinin ayrışması, filmde çatlak/gerilme birikimi ve bağ kuvvetinin sınırlı kalması gibi

problemler raporlanmaktadır. Uygulanan işlem parametrelerinin uygun aralıkta tanımlanmaması ve yeterince optimize edilmemesi durumunda, film görsel açıdan homojen görünmesine karşın çatlak içeren bir morfoloji sergileyebilir (Soare et al., 2015; Yoosefan et al., 2020).

Kaplama literatüründe ayrıca ark buhar biriktirme, vakum ark, PTA cladding, elektrosark biriktirme gibi yöntemler de yer almaktadır. Bu yaklaşımlar çoğu zaman belirli uygulama alanlarında öne çıkarta ve yüksek sertlikte nitrür kaplamalar ile hızlı ve yerel ölçekte gerçekleştirilen tamir ya da kaplama çözümleri buna örnek verilebilmektedir (Chandrakant et al., 2021; Gao et al., 2021; Pogrebnjak et al., 2014).

4.3. Magnetron Sıçratma ile HEA Üretimi

Magnetron sıçratma, HEA ince film/kaplama üretiminde en kontrol edilebilir ve en yaygın başvurulmuş yöntemlerden biridir. Temelde plazma içindeki iyonların hedefe çarpıp atomları koparması ve bu atomların altlık üzerinde yoğunlaşarak film oluşturmaları prensibine dayanmaktadır. Magnetron tasarımı, elektronların yolunu uzatarak iyonlaşma verimini artırır ve daha kararlı bir biriktirme sağlamaktadır. Uygulamada DC, RF, reaktif ve bias destekli türlere ayrılmaktadır. DC daha çok iletken hedefler için, RF yalıtkan veya zayıf iletken hedefler için, reaktif sıçratma oksit/karbür/nitrür gibi seramik karakterli filmler için, bias ise filmin yoğunluğunu ve yapışmasını yükseltmek için kullanılmaktadır (Luo et al., 2022; Patel, Roy, et al., 2022).

Bu yöntemi HEA'lar açısından özel yapan birkaç nokta mevcuttur. Birincisi, biriktirme denge dışı bir süreç olduğu için elementlerin uzun süreli difüzyonla ayrışma fırsatı sınırlanmaktadır. Bu da birçok HEA filmde kimyasal homojenliği artırır ve intermetaliklerin büyümesini baskılayabilmektedir. İkincisi, proses parametreleriyle (basınç, güç, altlık sıcaklığı, bias, gaz akışı) mikro yapıyı ince ayarlamak mümkündür. Aynı nominal kompozisyonda bile amorf–nanokristalin geçişi, kolonlu–yoğun morfoloji farkı veya tercihli yönelme gibi değişimler görülebilmektedir. Özellikle tribolojik ve korozyon performansı, bu mikro yapı ayarlarına çok duyarlıdır (Kim et al., 2020; W. Li et al., 2018; Shen et al., 2012; Xu et al., 2021).

Magnetron sıçratma yöntemiyle HEA film üretiminde temelde iki hedefleme yaklaşımı benimsenir. Birinci yaklaşım, doğrudan HEA alaşım hedefinin kullanılmasıdır. Bu yöntemde film bileşiminin hedef bileşimine yakın gerçekleşmesi görece daha kolaydır ve kaplama boyunca kompozisyonun daha kararlı kalması önemli bir üstünlük sağlamaktadır. Ancak HEA hedef üretimi zaman alabilir ve kompozisyonu hızlı değiştirmek esnek değildir. İkincisi, çoklu hedeflerden eşzamanlı biriktirme yapmaktır. Bu yaklaşım hedef hazırlama

yükünü azaltır ama ideal kompozisyonu tutturmak ve element akılarını dengelemek daha zordur. Ayrıca bazı koşullarda amorflaşma eğilimi de artabilmektedir (Z. Wang et al., 2020; Zou et al., 2015).

Reaktif magnetron sıçratma, HEA tabanlı kaplamaların ince film uygulamalarında öne çıkan ve süreci belirgin biçimde etkinleştiren yöntemlerden biridir. Sisteme azot, oksijen ya da karbon içeren reaktif gazların kontrollü biçimde beslenmesi sayesinde HEA nitrür, oksit veya karbür filmlerinin üretimi daha uygulanabilir ve yönetilebilir hale gelmektedir. Bu tür filmler, metalik süneklikten tamamen vazgeçmeden seramik benzeri yüksek sertlik ve aşınma direnci sunabilmektedir. Literatürde azot akışı arttıkça amorf yapıdan YMK tek faza geçiş gibi dönüşümlerin raporlanması, HEA filmlerde faz oluşumunun ne kadar doğrudan prosesle yönetilebildiğini iyi göstermektedir (Lewin, 2020; Si et al., 2022; J. Wang et al., 2021; Xu et al., 2020).

Parametre etkisini daha somut düşünüldüğünde, çalışma basıncı yükseldiğinde hedef-altlık arasındaki çarpışmalar artmakta ve gelen atomların enerji/taşınımı değişmektedir. Bu durum, çok elementli filmlerde elementlerin ulaşma hızını farklı şekillerde etkileyerek kompozisyon ve yoğunluk üzerinde belirgin sonuçlar doğurabilmektedir. Altlık sıcaklığının artırılması yüzey difüzyonunu belirgin biçimde yükseltir ve bu durum bazı koşullarda daha kristalin yapıda ve daha düşük kusur yoğunluğuna sahip filmlerin oluşumunu destekleyebilmektedir. Bununla birlikte belirli sıcaklık aralıklarında buharlaşma ve yeniden saçılma gibi süreçler devreye girerek biriktirme hızını ve film bileşimini değiştirebilmektedir. Bias gerilimi, iyon bombardımanını artırarak filmin yoğunluğunu ve altlığa tutunma performansını iyileştirebilmektedir. Bununla birlikte bu etki çoğu zaman iç gerilmenin yükselmesine ve nokta kusurlarının birikmesine de yol açmaktadır. Bu nedenle daha yüksek sertlik her koşulda daha iyi aşınma davranışı anlamına gelmeyebilir ve uygulamaya uygun dengeyi sağlayan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir (Cui et al., 2020; Jhong et al., 2018; Khan et al., 2021; Y. Wang et al., 2022).

HiPIMS gibi darbeli magnetron sıçratma türevleri, HEA filmlerinde yoğunluk ve işlevsel performans bakımından dikkat çeken seçenekler arasında yer almaktadır. Daha yüksek iyonlaşma oranı ve daha enerjik parçacık akısı, çoğu durumda daha kompakt bir morfolojinin oluşmasını ve altlığa bağlanmanın güçlenmesini desteklemektedir. Nitrür esaslı bazı HEA filmlerinde HiPIMS uygulamasıyla daha yoğun kesit yapısı elde edildiği ve sertliğin çok yüksek değerlere yaklaştığının bildirildiği çalışmalar bulunmaktadır. Reaktif gaz akışının artırılmasıyla hedef yüzeyinde zehirlenme oluşması ve buna bağlı olarak biriktirme hızının azalması gibi klasik sıçratma davranışları HEA sistemleri için de geçerlidir. Bununla birlikte çok elementli hedeflerde bu tür etkilerin film

kompozisyonuna yansması daha karmaşık hale gelebilir ve farklı elementlerin saçılma verimleri ile reaktivite eğilimleri nedeniyle bileşimde daha belirgin sapmalar görülebilmektedir (Bachani et al., 2021; Xu et al., 2020, 2021).

Magnetron sıçratma ile ince film üretiminde dikkate alınması gereken pratik ayrıntılardan biri ön sıçratma adımıdır. Hedef yüzeyi yeterince temizlenmeden veya sistem kararlı koşullara ulaşmadan yapılan biriktirmelerde, saçılma verimi daha yüksek olan elementlerin filmin başlangıç kısmında görece daha yüksek oranlarda birikmesi görülmektedir. Biriktirme kararlı rejime geçtiğinde ise film bileşiminin hedef bileşimine daha fazla yaklaştığı ifade edilmektedir. Bu tür ayrıntılar, HEA filmlerde kompozisyonun kararlı ve tekrarlanabilir biçimde elde edilmesi için işlem disiplininin belirleyici önemini ortaya koymaktadır (Muhammad Nadzri et al., 2022).

Magnetron sıçratma, yüksek film yoğunluğu sağlayabilmesi ile birlikte ince film kalınlıklarında iyi homojenlik sunması sayesinde önemli bir kaplama yaklaşımıdır. Ayrıca reaktif süreçlerin uygulanabilmesiyle nitrür, karbür ve oksit gibi yüksek performanslı yüzeylerin üretimi mümkün hale gelmektedir. Bu özellikler, özellikle hassas geometrilili parçalar ile mikroelektronik ve sensör yüzeyleri gibi boyutsal hassasiyet gerektiren uygulamalarda ve yüksek aşınma dayanımı hedeflenen ince kaplamalarda yöntemin belirgin bir üstünlük kazanmasına katkı sağlamaktadır. Buna karşılık film kalınlığının belirli sınırlar içinde kalması, hedef malzemenin kullanım veriminin düşük olabilmesi ve çok elementli sistemlerde hedef ve kompozisyon kontrolünün daha dikkatli biçimde yürütülmesi yöntemin başlıca kısıtları arasında değerlendirilebilir (Luo et al., 2022; Miracle & Senkov, 2017).

Referanslar

- Bachani, S. K., Wang, C. J., Lou, B. S., Chang, L. C., & Lee, J. W. (2021). Fabrication of TiZrNbTaFeN high-entropy alloys coatings by HiPIMS: Effect of nitrogen flow rate on the microstructural development, mechanical and tribological performance, electrical properties and corrosion characteristics. *Journal of Alloys and Compounds*, 873, 159605. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159605>
- Cai, Y., Chen, Y., Manladan, S. M., Luo, Z., Gao, F., & Li, L. (2018). Influence of dilution rate on the microstructure and properties of FeCrCoNi high-entropy alloy coating. *Materials and Design*, 142(31), 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.007>
- Cantor, B. (2014). Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*, 16(9), 4749–4768. <https://doi.org/10.3390/e16094749>
- Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., & Vincent, A. J. B. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 375–377(1-2 SPEC. ISS.), 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
- Chandrakant, Reddy, N. S., & Panigrahi, B. B. (2021). Electro spark coating of AlCoCrFeNi high entropy alloy on AISI410 stainless steel. *Materials Letters*, 304(July), 130580. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130580>
- Cui, P., Li, W., Liu, P., Zhang, K., Ma, F., Chen, X., Feng, R., & Liaw, P. K. (2020). Effects of nitrogen content on microstructures and mechanical properties of (AlCrTiZrHf)N high-entropy alloy nitride films. *Journal of Alloys and Compounds*, 834, 155063. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155063>
- Dong, W., Zhou, Z., Zhang, M., Ma, Y., Yu, P., & Liaw, P. K. (2019). *Applications of High-Pressure Technology for High-Entropy Alloys : A Review*.
- Gao, P. H., Fu, R. T., Chen, B. Y., Zeng, S. C., Zhang, B., Yang, Z., Guo, Y. C., Liang, M. X., Li, J. P., Lu, Y. Q., Jia, L., & Zhao, D. (2021). Corrosion resistance of coCrFeNiMn high entropy alloy coating prepared through plasma transfer arc claddings. *Metals*, 11(11), 1–17. <https://doi.org/10.3390/met11111876>
- Han, Z. D., Luan, H. W., Liu, X., Chen, N., Li, X. Y., Shao, Y., & Yao, K. F. (2018). Microstructures and mechanical properties of Ti_xNbMoTaW refractory high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 712(December 2017), 380–385. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.004>
- Huang, P. K., Yeh, J. W., Shun, T. T., & Chen, S. K. (2004). Multi-principal-

- element alloys with improved oxidation and wear resistance for thermal spray coating. *Advanced Engineering Materials*, 6(1–2), 74–78. <https://doi.org/10.1002/adem.200300507>
- Jhong, Y. S., Huang, C. W., & Lin, S. J. (2018). Effects of CH₄ flow ratio on the structure and properties of reactively sputtered (CrNbSiTiZr)C_x coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 210, 348–352. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.08.002>
- Jin, X., Bi, J., Zhang, L., Zhou, Y., Du, X., Liang, Y., & Li, B. (2019). A new CrFeNi₂Al eutectic high entropy alloy system with excellent mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 770, 655–661. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.176>
- Khan, N. A., Akhavan, B., Zheng, Z., Liu, H., Zhou, C., Zhou, H., Chang, L., Wang, Y., Liu, Y., Sun, L., Bilek, M. M., & Liu, Z. (2021). Nanostructured AlCoCrCu_{0.5}FeNi high entropy oxide (HEO) thin films fabricated using reactive magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 553(March), 149491. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149491>
- Kim, Y. S., Park, H. J., Lim, K. S., Hong, S. H., & Kim, K. B. (2020). Structural and mechanical properties of AlCoCrNi high entropy nitride films: Influence of process pressure. *Coatings*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/coatings10010010>
- Komal, Verma, A., Dev Tanwar, J., Tawale, J. S., Kushwaha, P., Borgohain, B., Siwach, P. K., Yadav, T. P., & Singh, H. K. (2024). Elucidation of annealing effects on austenite–martensite and magnetic phase transitions in Mn₂Ni_{1.6}Sn_{0.4} ribbons synthesized from bulk alloys prepared by RF induction melting. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 603(April), 172270. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172270>
- Kumar, D. (2023). Recent advances in tribology of high entropy alloys: A critical review. *Progress in Materials Science*, 136(March), 101106. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101106>
- Lewin, E. (2020). Multi-component and high-entropy nitride coatings - A promising field in need of a novel approach. *Journal of Applied Physics*, 127(16). <https://doi.org/10.1063/1.5144154>
- Li, P., Wang, A., & Liu, C. T. (2017). A ductile high entropy alloy with attractive magnetic properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.186>
- Li, W., Liu, P., & Liaw, P. K. (2018). Microstructures and properties of high-entropy alloy films and coatings: A review. *Materials Research Letters*, 6(4), 199–229. <https://doi.org/10.1080/21663831.2018.1434248>
- Lin, C. M., & Tsai, H. L. (2011). Evolution of microstructure, hardness, and

- corrosion properties of high-entropy Al_{0.5}CoCrFeNi alloy. *Intermetallics*, 19(3), 288–294. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.10.008>
- Lucas, M. S., Wilks, G. B., Mauger, L., Munoz, J. A., Senkov, O. N., Michel, E., Horwath, J., Semiatin, S. L., Stone, M. B., & Abernathy, D. L. (2012). Absence of long-range chemical ordering in equimolar FeCoCrNi. *Applied Physics Letters*, 100(25).
- Luo, D., Zhou, Q., Huang, Z., Li, Y., Liu, Y., Li, Q., He, Y., & Wang, H. (2022). Tribological Behavior of High Entropy Alloy Coatings: A Review. *Coatings*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/coatings12101428>
- Meghwal, A., Anupam, A., Murty, B. S., Berndt, C. C., Kottada, R. S., & Ang, A. S. M. (2020). Thermal Spray High-Entropy Alloy Coatings: A Review. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 29, Number 5). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01047-0>
- Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- Muhammad Nadzri, N. I., Halin, D. S. C., Al Bakri Abdullah, M. M., Joseph, S., Mohd Salleh, M. A. A., Vizureanu, P., Burduhos-Nergis, D. P., & Sandu, A. V. (2022). High-Entropy Alloy for Thin Film Application: A Review. *Coatings*, 12(12), 1–11. <https://doi.org/10.3390/coatings12121842>
- Murty, B. S., Yeh, J.-W., Ranganathan, S., & Bhattacharjee, P. P. (2019). *High-entropy alloys*. Elsevier.
- Onawale, O. T., Cobbinah, P. V., Nzeukou, R. A., & Matizamhuka, W. R. (2021). Synthesis route, microstructural evolution, and mechanical property relationship of high-entropy alloys (HEAs): A review. *Materials*, 14(11), 3065.
- Otto, F., Yang, Y., Bei, H., & George, E. P. (2013). Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 61(7), 2628–2638. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.01.042>
- Padamata, S. K., Yasinskiy, A., Yanov, V., & Saevarsdottir, G. (2022). Magnetron sputtering high-entropy alloy coatings: A mini-review. *Metals*, 12(2), 319.
- Patel, P., Alidokht, S. A., Sharifi, N., Roy, A., Harrington, K., Stoyanov, P., Chromik, R. R., & Moreau, C. (2022). Microstructural and Tribological Behavior of Thermal Spray CrMnFeCoNi High Entropy Alloy Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31(4), 1285–1301. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01350-y>
- Patel, P., Roy, A., Sharifi, N., Stoyanov, P., Chromik, R. R., & Moreau, C. (2022).

Tribological Performance of High-Entropy Coatings (HECs): A Review.

- Pogrebnjak, A. D., Yakushchenko, I. V., Bagdasaryan, A. A., Bondar, O. V., Krause-Rehberg, R., Abadías, G., Chartier, P., Oyoshi, K., Takeda, Y., Beresnev, V. M., & Sobol, O. V. (2014). Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (Ti-Hf-Zr-V-Nb)N coatings under different deposition conditions. *Materials Chemistry and Physics*, 147(3), 1079–1091. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.06.062>
- Praveen, S., & Kim, H. S. (2018). High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview. *Advanced Engineering Materials*, 20(1), 1–22. <https://doi.org/10.1002/adem.201700645>
- Qiu, X. W., & Liu, C. G. (2013). Microstructure and properties of Al₂CrFeCoCuTiN_x high-entropy alloys prepared by laser cladding. *Journal of Alloys and Compounds*, 553, 216–220. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.100>
- Ragunath, S., Radhika, N., & Saleh, B. (2024). Advancements and future prospects of additive manufacturing in high-entropy alloy applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 997(February), 174859. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174859>
- Ramanathan, A., Krishnan, P. K., & Muraliraja, R. (2019). A review on the production of metal matrix composites through stir casting – Furnace design, properties, challenges, and research opportunities. *Journal of Manufacturing Processes*, 42(April), 213–245. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.017>
- Senkov, O. N., Wilks, G. B., Scott, J. M., & Miracle, D. B. (2011). Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys. *Intermetallics*, 19(5), 698–706. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.01.004>
- Shen, W. J., Tsai, M. H., Chang, Y. S., & Yeh, J. W. (2012). Effects of substrate bias on the structure and mechanical properties of (Al_{1.5}CrNb_{0.5}Si_{0.5}Ti)_N x coatings. *Thin Solid Films*, 520(19), 6183–6188. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.06.002>
- Si, Y., Wang, G., Wen, M., Tong, Y., Wang, W., Li, Y., Yan, L., Yu, W., Zhang, S., & Ren, P. (2022). Corrosion and friction resistance of TiVCrZrWN_x high entropy ceramics coatings prepared by magnetron sputtering. *Ceramics International*, 48(7), 9342–9352. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.129>
- Soare, V., Burada, M., Constantin, I., Mitrică, D., Bădiliță, V., Caragea, A., & Târcolea, M. (2015). Electrochemical deposition and microstructural characterization of AlCrFeMnNi and AlCrCuFeMnNi high entropy alloy

- thin films. *Applied Surface Science*, 358, 533–539. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.142>
- Tsai, M. H., & Yeh, J. W. (2014). High-entropy alloys: A critical review. *Materials Research Letters*, 2(3), 107–123. <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>
- Wang, J., Zhang, H., Yu, X., Wang, L., Huang, W., & Lu, Z. (2021). Insight into the structure and tribological and corrosion performance of high entropy (CrNbSiTiZr)C films: First-principles and experimental study. *Surface and Coatings Technology*, 421(April). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127468>
- Wang, Y., He, N., Wang, C., Li, J., Guo, W., Sui, Y., & Lan, J. (2022). Microstructure and tribological performance of (AlCrWTiMo)N film controlled by substrate temperature. *Applied Surface Science*, 574(August 2021), 151677. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151677>
- Wang, Z., Wang, C., Zhao, Y. L., Hsu, Y. C., Li, C. L., Kai, J. J., Liu, C. T., & Hsueh, C. H. (2020). High hardness and fatigue resistance of CoCrFeMnNi high entropy alloy films with ultrahigh-density nanotwins. *International Journal of Plasticity*, 131(January), 102726. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2020.102726>
- Wu, J. M., Lin, S. J., Yeh, J. W., Chen, S. K., Huang, Y. S., & Chen, H. C. (2006). Adhesive wear behavior of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloys as a function of aluminum content. *Wear*, 261(5–6), 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.12.008>
- Wu, W.-H., Yang, C.-C., & Yeh, L. W. (2006). Industrial development of high-entropy alloys. *Annales de Chimie-Science Des Materiaux*, 31(6), 737.
- Xu, Y., Li, G., Li, G., Gao, F., & Xia, Y. (2021). Effect of bias voltage on the growth of super-hard (AlCrTiVZr)N high-entropy alloy nitride films synthesized by high power impulse magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 564(March), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150417>
- Xu, Y., Li, G., & Xia, Y. (2020). Synthesis and characterization of super-hard AlCrTiVZr high-entropy alloy nitride films deposited by HiPIMS. *Applied Surface Science*, 523(January). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146529>
- Yadav, Y. K., Shaz, M. A., Mukhopadhyay, N. K., & Yadav, T. P. (2025). High entropy alloys synthesized by mechanical alloying: A review. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 9(February), 100170. <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2025.100170>
- Yeh, J. W. (2013). Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *Jom*, 65(12), 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013->

- Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Tsau, C. H., & Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- Yoosefan, F., Ashrafi, A., Monir vaghefi, S. M., & Constantin, I. (2020). Synthesis of CoCrFeMnNi High Entropy Alloy Thin Films by Pulse Electrodeposition: Part 1: Effect of Pulse Electrodeposition Parameters. *Metals and Materials International*, 26(8), 1262–1269. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00404-1>
- Yue, T. M., Xie, H., Lin, X., Yang, H. O., & Meng, G. H. (2014). Solidification behaviour in laser cladding of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy on magnesium substrates. *Journal of Alloys and Compounds*, 587, 588–593. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.254>
- Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., & Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 61(October 2013), 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
- Zhou, Q., Du, Y., Ren, Y., Kuang, W., Han, W., Wang, H., Huang, P., Wang, F., & Wang, J. (2019). Investigation into nanoscratching mechanical performance of metallic glass multilayers with improved nano-tribological properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 776, 447–459. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.270>
- Zou, Y., Ma, H., & Spolenak, R. (2015). Ultrastrong ductile and stable high-entropy alloys at small scales. *Nature Communications*, 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms8748>

2. Bölüm

Değişken Hız Sürücülü (VSD) Kompresörlerin Enerji Tasarrufu Değerlendirmesi

Emre TARGAY¹, Mustafa Tahir AKKOYUNLU²

1. GİRİŞ

Endüstriyel sektör, 2024-2025 verilerine göre küresel nihai enerji tüketiminin yaklaşık %40'ından sorumludur ve bu tüketimin önemli bir kısmını motor tahrikli sistemler oluşturmaktadır [1]. Bu sistemler içinde "beşinci yardımcı tesis" olarak adlandırılan basınçlı hava sistemleri (CAS), gelişmiş ve gelişmekte olan ekonomilerdeki toplam endüstriyel elektrik faturasının ortalama %10'unu teşkil etmektedir [2]. Ancak, termodinamik açıdan bakıldığında, bu sistemlere verilen elektrik enerjisinin yalnızca %10 ila %30'u uç noktada faydalı işe dönüşmekte; geri kalan %70-%90'luk kısım ise ısı, sürtünme ve sızıntı kayıpları olarak atıl kalmaktadır [3].

Literatürde, basınçlı hava sistemlerindeki verimsizliğin temel kaynağı olarak değişken talep profilleri ile sabit hızlı kompresörlerin uyumsuzluğu gösterilmektedir. Geleneksel "Yükte/Boşta" kontrol yöntemine sahip kompresörler, hava üretmedikleri "boşta çalışma" (unloaded) modunda bile nominal güçlerinin %20 ile %40'ı arasında enerji tüketmeye devam etmektedir. Uluslararası kaynaklar, bu kayıpların minimize edilmesi için Değişken Hız Sürücülü (VSD) teknolojisini en etkin çözüm olarak sunmaktadır. VSD sistemleri, motor hızını anlık talebe göre modüle ederek Spesifik Enerji Tüketimini (SEC- \$ kW h/m³\$) optimize etmekte ve işletmelere %15'ten %50'ye varan oranlarda enerji tasarrufu sağlamaktadır [4].

COP28'de kararlaştırılan "küresel enerji verimliliği ilerleme hızını iki katına çıkarma" hedefi doğrultusunda, VSD gibi motor kontrol teknolojilerinin yaygınlaştırılması, endüstriyel karbonsuzlaştırma stratejilerinin merkezinde yer almaktadır [5]. Basınçlı hava sistemlerinde VSD entegrasyonu, yalnızca bir motor hız kontrolü işlemi değil, aynı zamanda sistemin dinamik yanıt verme kabiliyetini artıran bütüncül bir optimizasyon stratejisidir. Geleneksel sistemlerde basınç bandının geniş tutulması (örneğin 6.5- 7.5 bar arası), hem kaçak miktarını artırmakta hem de her 1 barlık gereksiz basınç artışının toplam

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, radonmaster25@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-3214-3173>

² Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

enerji tüketiminde yaklaşık %7'lik bir ek yük oluşturmaya neden olmaktadır [6]. VSD teknolojisi, basınç dalgalanmalarını 0.1 bar gibi dar bir aralıkta stabilize ederek, aşırı basınçlandırmadan kaynaklanan bu gizli enerji israfını ortadan kaldırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: VSD, Kompresör, Enerji Verimi, Yaşam Döngüsü Maliyeti

2. BASINÇLI HAVA NEDİR?

Basınçlı hava, sanayi tesislerinde yaygın olarak kullanılan, temel bir enerji taşıyıcısı ve üretim sürecini destekleyen yardımcı bir sistemdir. Temel olarak atmosferik havanın, belirli bir basınca kadar sıkıştırılmasıyla elde edilen bu enerji kaynağı, farklı debi ve basınç seviyelerinde çeşitli uygulamalarda kullanılır. Basınçlı hava, özellikle üretim hatlarında otomasyon, malzeme taşıma, kontrol sistemleri ve temizleme gibi çok sayıda işlev sunar [7].

Basınçlı hava, atmosferik havanın belirli mekanizmalar vasıtasıyla kompresyon işlemine tabi tutulmasıyla elde edilen, endüstriyel süreçlerin temel enerji taşıyıcılarından biridir. Akışkanın doğrudan atmosferden tedarik edilebilmesi ve kullanım sonrası bir geri dönüş hattına gereksinim duymadan tahliye edilebilmesi, sistem tasarımında operasyonel bir esneklik sağlamaktadır. Bununla birlikte, basınçlı havanın yanıcı olmayan doğası ve elektriksel kıvılcım riski barındırmaması, patlayıcı (Ex-proof) veya yüksek sıcaklıklı çalışma ortamlarında güvenli bir enerji iletim ortamı sunarak onu stratejik bir tercih haline getirmektedir [8].

Küresel endüstriyel enerji projeksiyonları, basınçlı hava sistemlerinin toplam elektrik tüketimindeki payının %10 seviyelerinde olduğunu doğrulamaktadır. Özellikle proses yoğun sektörlerde bu sistemlerin verimlilik çıktıları, işletme maliyetleri ve sürdürülebilirlik performansı ile doğrudan ilişkilidir. Ancak, operasyonel hatalar ve teknolojik eskimişlik nedeniyle bu sistemlerde meydana gelen enerji kayıpları, maliyet artışlarını tetikleyen temel bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır [9].

Basınçlı havanın kullanım alanlarına bakacak olursak;

- a) **Endüstriyel İmalat ve Otomasyon (Pnömatik Güç):** Endüstride en yaygın kullanım alanı, mekanik iş üretmek amacıyla pnömatik sistemlerin tahrik edilmesidir.
- **Pnömatik Aktüatörler ve Robotik:** Fabrika otomasyon hatlarında kolların hareketi, parçaların tutulması ve yerleştirilmesi basınçlı hava silindirleri ile sağlanır.

- **Pnömatik El Aletleri:** Somun sıkma, perçinleme, zımparalama ve taşlama gibi yüksek tork veya hız gerektiren aletlerde elektrikli motorlara göre daha hafif ve güvenli oldukları için tercih edilirler.
- **Montaj Hatları:** Otomotiv ve beyaz eşya sektöründe konveyör sistemlerinin kontrolü ve parça transferinde temel güç kaynağıdır.
- b) **Proses Hava ve Malzeme Nakli:** Havanın sadece bir güç kaynağı değil, doğrudan prosesin bir parçası olduğu alanlardır.
- **Pnömatik Taşıma (Pneumatic Conveying):** Çimento, un, toz şeker veya plastik hammaddelerin boru hatları içerisinde hava akımıyla taşınmasıdır.
- **Püskürtme ve Kaplama:** Otomotiv boyahanelerinde boyanın homojen bir şekilde yüzeye dağıtılması için yüksek kalitede (yağsız ve kuru) basınçlı hava kullanılır.
- **PET Şişe Şişirme:** Gıda endüstrisinde plastik preformların yüksek basınçlı hava (genellikle 30-40 bar) ile kalıp içerisinde şişirilerek son formuna getirilmesi işlemidir.
- c) **Gıda, İlaç ve Tıbbi Uygulamalar:** Bu alanlarda havanın kalitesi (ISO 8573-1 standardına göre yağsızlık ve sterilizasyon) kritik önem taşır.
- **Steril Paketleme:** Ürünlerin paketlenmesi sırasında ortamdaki oksijeni uzaklaştırmak veya paketleme mekanizmalarını hijyenik şekilde çalıştırmak için kullanılır.
- **Solunabilir Hava:** Hastanelerde yoğun bakım ünitelerinde ve diş ünitelerinde (dental air) hastaların kullanımı için filtre edilmiş hava sağlanır.
- **İlaç Üretimi:** Tabletlerin kaplanması, toz ilaçların karıştırılması ve steril dolum hatlarında basınçlı havadan yararlanılır.
- d) **Enerji ve Ağır Sanayi:** Kontrol vanalarının (actuated valves) yönetimi ve kurum üfleyiciler (soot blowers) aracılığıyla kazan borularının temizlenmesi.
- **Madencilik:** Yeraltı ocaklarında hem havalandırma sağlamak hem de kaya matkaplarını çalıştırmak için kullanılır. Elektrikli sistemlerin kıvılcım riski oluşturduğu metan gazlı ortamlarda basınçlı hava tek güvenli seçenektir.
- e) **Diğer Uygulamalar:** Temizlik ve bakım için hassas döküm parçalarının temizlenmesi veya tekstil makinelerindeki iplik atıklarının uzaklaştırılması.
- **Atık Su Arıtma:** Difüzörler aracılığıyla suya hava verilerek (aerasyon) bakterilerin organik maddeleri parçalaması sağlanır.

Genel manası ile basınçlı havanın kullanıldığı sanayii ve çevre ile alakalı alanların dışında özel olarak uygulanması gereken proseslerde, kimyasal veya fiziksel ortamlarda bulunan durumlarda başlıca kullanılır. Ancak bu durum ihtiyaca göre değişir.

3. KOMPRESÖR NEDİR?

Gıda endüstrisinde sürdürülebilir üretim stratejileri; ürünlerin kalitatif özelliklerinin korunması, enerji verimliliğinin maksimizasyonu ve çevresel etkilerin minimizasyonu parametrelerine dayanmaktadır. Gıdaların mikrobiyolojik ve fizikokimyasal stabilitesinin sağlanması için temel bir gereksinim olan soğuk muhafaza, endüstriyel soğutma sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda, mekanik buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin kalbi konumundaki kompresörler, sistemin toplam ekserji tüketiminin en yoğun olduğu bileşendir [10].

Endüstriyel soğutucuların performans katsayısını (COP) optimize etmek ve spesifik enerji tüketimini asgari düzeye indirmek, doğrudan kompresörün operasyonel verimliliği ile ilişkilidir. Kompresörler, sadece termodinamik çevrimin sürekliliğini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda uluslararası gıda güvenliği standartları gereği (HACCP vb.) zorunlu olan hassas sıcaklık kontrolünün idame ettirilmesinde birincil rolü üstlenmektedir [11].

Günümüzde enerji maliyetlerinin artışı ve sürdürülebilirlik hedefleri, sanayi tesislerinde enerji verimliliğini bir zorunluluk haline getirmiştir. Endüstriyel tesislerdeki toplam elektrik tüketiminin önemli bir kısmından sorumlu olan basınçlı hava ve iklimlendirme sistemleri, bu verimlilik arayışının merkezinde yer almaktadır.

İşletmelerin ihtiyaçlarına en uygun kompresör konfigürasyonunu belirlemek kadar, mevcut sistemlerin gerçek çalışma koşullarındaki performansını denetlemek de kritik bir süreçtir. Bu süreç, sadece basit bir verim hesabı değil; basınç, sıcaklık, kütsel debi ve güç tüketimi gibi dinamik parametrelerin sürekli takibiyle gerçekleştirilen kapsamlı bir analiz bütünüdür.

Kompresörler farklı boyutlarda, farklı işlevsellikte veya farklı özelliklerde üretilebilir. Hangi sistemde kullanılabilecek olması için yukarıda belirtilen şartların sağlanması gereklidir. Bununla birlikte sistemlerin elverişliliğinin olması başlıca esaslarından birisidir. Kompresör çeşitlerini ve türlerini ele alacak olursak;

Endüstriyel sistemlerde kompresörler, gazların basıncını artırmak amacıyla kullanılan temel mekanik cihazlardır. Çalışma prensiplerine göre kompresörler; Sabit hızlı ve değişken hızlı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır.

3.1 Sabit Hızlı Kompresörler

Bu sistemlerde gaz, dönen kanatlar aracılığıyla kinetik enerji kazanır ve bu enerji daha sonra basınç enerjisine dönüştürülür [12].

3.1.1 Santrifüj Kompresörler

Gazın merkeze alınarak radyal bir doğrultuda hızlandırılması prensibiyle çalışır [12].

- **Çalışma Prensibi:** Gaz, dairesel haznenin merkezine girer ve yüksek hızda dönen çark (impeller) etkisiyle merkezkaç kuvveti altında ivmelenir. Difüzör kısmına geldiğinde hızı düşer; Bernoulli İlkesi gereği azalan kinetik enerji, statik basınç artışına dönüşür.
- **Avantajları:** Sürekli gaz akışı sağlar. Sürtünen parça sayısı az olduğundan bakım maliyetleri düşüktür.
- **Kısıtlamalar:** Yüksek devirlerde çalıştığı için eksenel dengeleme hayati önem taşır; en ufak sapma yüksek vibrasyona neden olur [12].

3.2.2 Eksenel Akımlı Kompresörler

Gazın dönme eksenine paralel hareket ettiği, yüksek debili sistemlerdir [12].

- **Yapısal Bileşenler:** Rotor (dönen kanatlar) ve Stator (sabit kanatlar) dizilerinden oluşur.
- **İşleyiş:** Gaz helisel bir yol izleyerek ilerler. Her kademede hızı artırılıp tekrar düşürülerek basınç kademeli olarak yükseltilir.
- **Kullanım Alanı:** Genellikle gaz türbinleri ve jet motorları gibi büyük hacimli hava akışına ihtiyaç duyulan alanlarda tercih edilir [12].

3.2 Değişken Hızlı Kompresörler

Gazın belirlenen set değerlerine ayarlanıp istenilen seviyede sisteme verildiği ve kullanıldığı kompresör çeşididir [12].

3.2.1 Pistonlu Kompresörler

Krank-biyel mekanizması ile doğrusal hareket eden pistonların kullanıldığı klasik teknolojidir [12].

Mekanizma: Motor milinden alınan dairesel hareket, krank mili ve biyel kolu vasıtasıyla pistonun ileri-geri hareketine dönüştürülür [12].

Türleri:

- **Kayış-Kasnaklı:** Motor ve kompresör ünitesi arası güç iletimi kayışla sağlanır.
- **Akuple (Doğrudan Tahrikli):** Motor ve krank mili doğrudan bağlıdır; enerji iletim kaybı düşüktür.
- **Yüksek Basıncılı:** Çok kademeli sıkıştırma yaparak yüksek basınç gereksinimlerini karşılar.

3.2.2 Dönel (Rotary) Kompresörler

Dönen parçaların (rotor, vida veya lob) oluşturduğu hücrelerde gazın hacminin küçültülmesi esasına dayanır [12].

- **Özellik:** Akış daha sürekli ve pistonlu modellere göre daha az titreşim üretirler. Doğalgaz endüstrisinde ve kirli gazların transferinde dayanıklılıkları nedeniyle tercih edilirler [12].

3.3 Özel Tip Kompresörler: Jet ve Hidrolik Sistemler

Hareket parçası olmayan, akışkan dinamiğine bağlı sistemlerdir [12].

3.3.1 Jet Kompresörleri (Ejektörler)

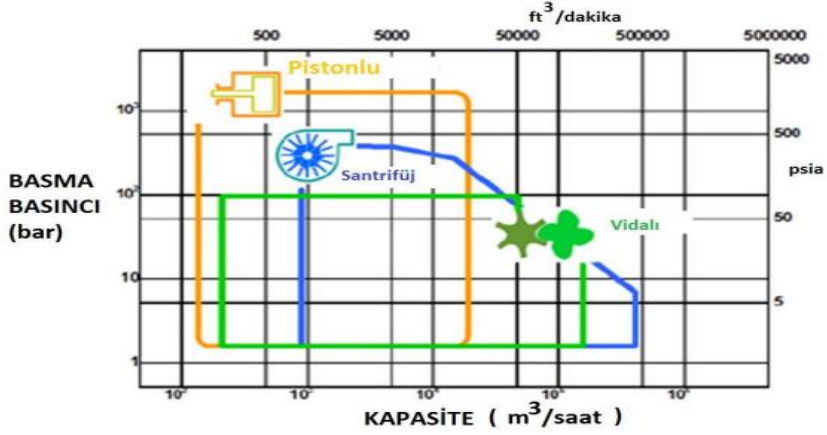
Hareketli parçası olmayan, akışkan dinamiğine dayalı sistemlerdir [12].

- **Gaz ve Buhar Kompresörleri:** Yüksek basınçlı bir akışkanın (buhar veya hava) dar bir ağızdan (nozül) geçerken yarattığı vakum etkisiyle düşük basınçlı gazı sürüklemesi prensibiyle çalışır. Verimi düşük olsa da servis maliyeti yok denecek kadar azdır [12].

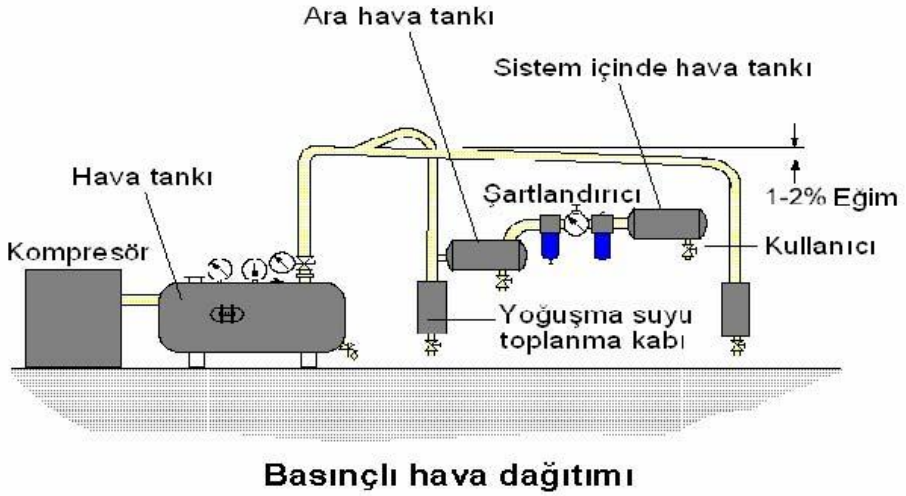
3.3.2 Hidrolik Kompresörler

Herhangi bir mekanik parça kullanmadan, suyun potansiyel enerjisiyle havayı sıkıştıran sistemlerdir [12].

- **Taylor Kompresörü:** Suyun yüksekte düşerken havayı beraberinde sürüklemesi ve alt seviyede havanın basınçlı bir şekilde ayrışması prensibidir. İlk yatırım maliyeti yüksek olsa da işletme maliyeti oldukça düşüktür [12].



Şekil 1. Kapasite ve Basınç Değerlerine Göre Kompresör Çeşitleri



Şekil 2. Örnek Bir Kompresörün Şematik Gösterimi

4. MATERYAL VE METODOLOJİ

Yapılacak olan bu çalışmada bir soğuk hava deposu ele alınacaktır. Soğuk hava deposunun özellikleri ise şu şekilde olacaktır;

Boyut: 50 m x 50 m x 200 m

$T_{dış}$: 27 °C

$T_{iç}$: -3 °C

Isı İletim Katsayısı: 0,296 W/m²K

İç ve Dış Yalıtkan Kalınlığı: 10 mm

$$Q= U.A.\Delta T$$

$$U= 0,296 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$A= 45.000\text{m}^2$$

$$\Delta T= 27-(-3) =30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q=0,296*45000*30 =399,6 \text{ kW} \sim 400\text{kW}$$

Bu şartlarda çalışacak bir soğutma sisteminin maksimum verimle 400 kW kapasitede çalışması gerekmektedir. Bu çalışmada 4 farklı senaryo ele alınmıştır. Senaryolar ise şu şekildedir:

1.Senaryo: 2 Adet değişken hız kompresörü kullanılmıştır.

2.Senaryo: 2 Adet sabit hız kompresörü kullanılmıştır.

3.Senaryo: 1 Adet sabit (yüksek kapasiteli) + 1 Adet değişken hız kompresörü kullanılmıştır.

4.Senaryo: 1 Adet sabit + 1 Adet değişken hız kompresörü (yüksek kapasiteli) kullanılmıştır.

Kullanılan kompresörler Yarı Hermetik-Vidalı kompresörlerdir. Bu kompresörlerin çalışma eğrileri ve çalışma bilgileri Danfoss CoolSelector V2 aracılığı ile alınmıştır. Çalışmada referans alınan değerler ise aşağıdaki gibidir:

Dış Sıcaklık: 27°C

İç Sıcaklık: -3°C

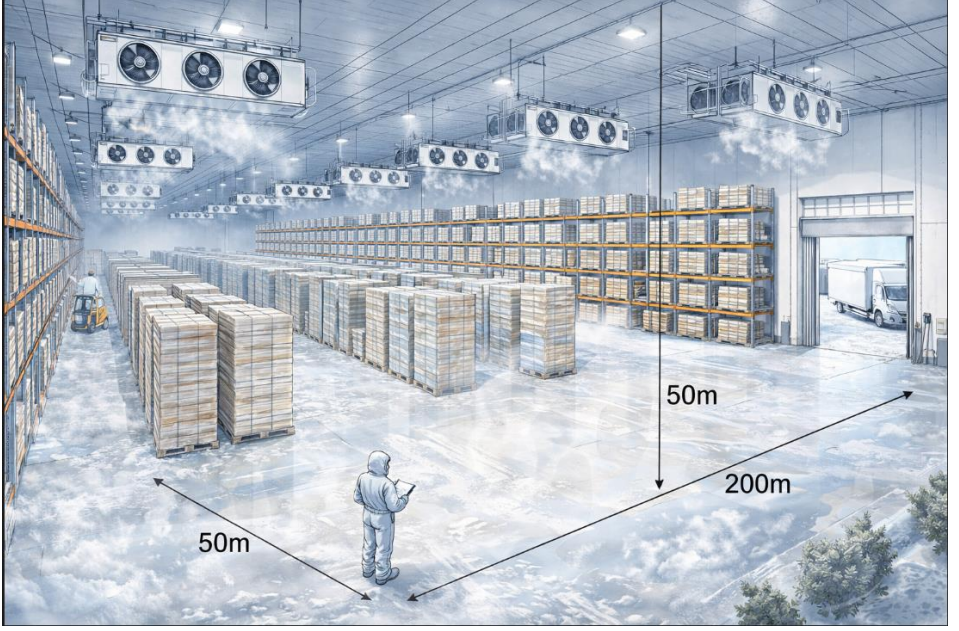
Kondenzasyon Sıcaklığı: 42°C

Evaporasyon Sıcaklığı: -8°C

Aşırı Isıtma: 6°C

Aşırı Soğutma: 5 °C

Soğutucu Akışkan: R134-A

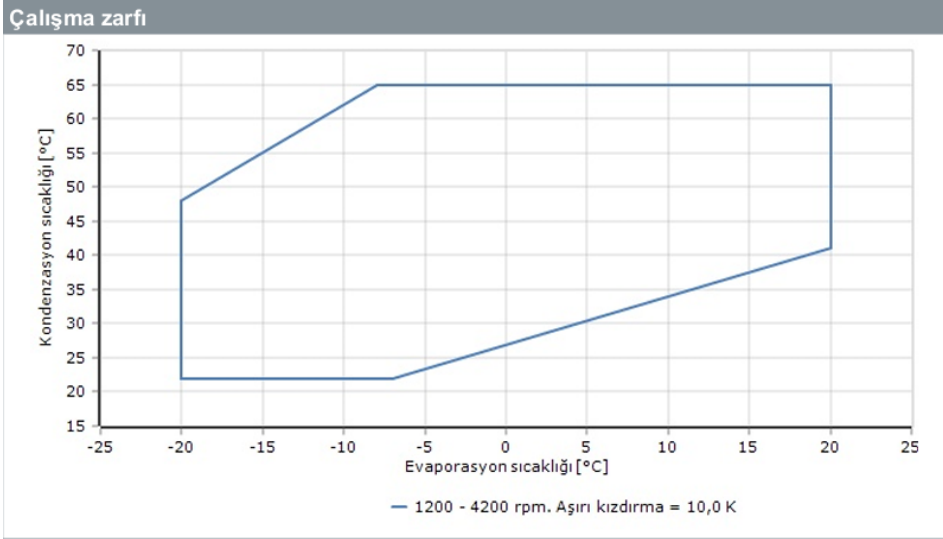


Şekil 3. Soğuk Hava Deposunun İç Gösterimi



Şekil 4. Yarı Hermetik Vidalı Kompresör

1.Senaryoda bulunan KS1RW0410NDIC kodlu kompresör kullanılmıştır.
Kullanılan kompresörün değerleri aşağıda gösterilmiştir.



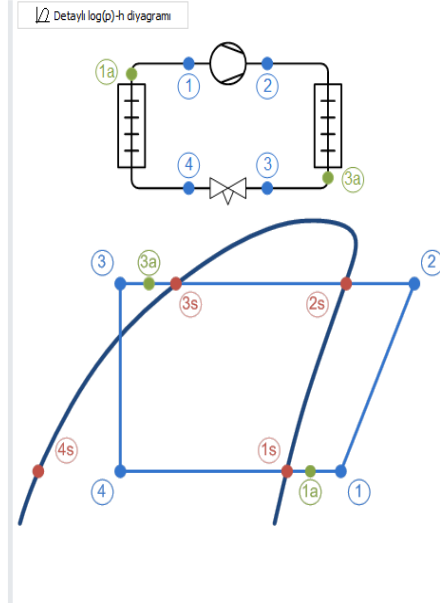
Şekil 5. 1.Senaryonun Kompresörünün Çalışma Zarfı

Tüm değerler verilen çalışma koşulları baz alınarak hesaplanmıştır.

Seçili kompresör veya kondenzasyon ünitesi kapasitesi kütle akışını hesaplamakta kullanılır.

Kompresördeki kütesel debi: 4922 kg/h

Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç (a) [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg·K)]
1	Kompresör emişi	-2,0	2,170	10,51	399	1,751
2	Kompresör basması (tahmini)	71,0	10,72	44,54	453,2	1,81
2s	Kondenzasyon çiy noktası	42,0	10,72	52,97	421	1,713
3s	Kondenzasyon kaynama noktası	42,0	10,72	1139	260,2	1,203
3a	Kondenser çıkış	37,0	10,72	1160	252,7	1,179
3	İlave aşırı soğutma dahilidir	37,0	10,72	1160	252,7	1,179
4	Genleşme valfinden sonra	-8,0	2,170	34,25	252,7	1,199
4s	Evaporasyon kaynama noktası	-8,0	2,170	1321	189,2	0,9601
1s	Evaporasyon çiy noktası	-8,0	2,170	10,82	393,8	1,732
1a	Evaporatör çıkış	-2,0	2,170	10,51	399	1,751



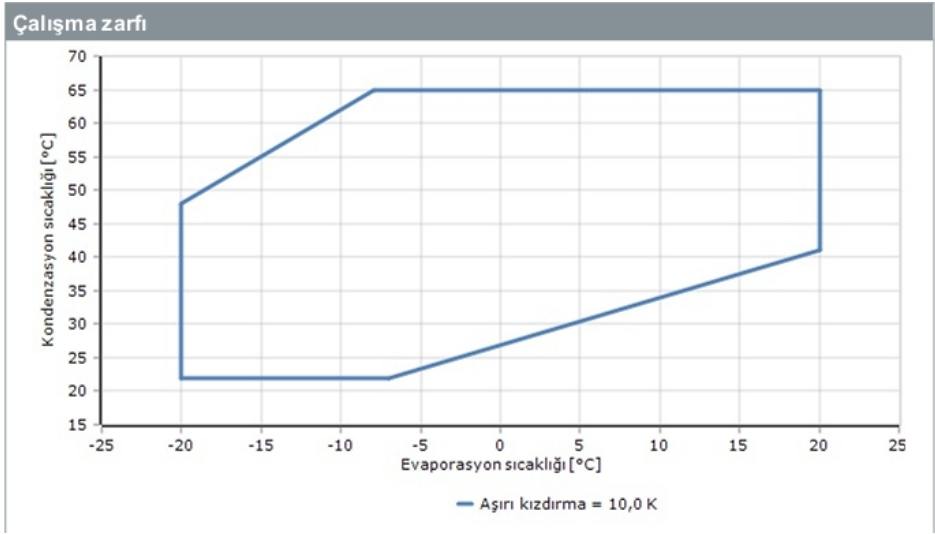
Şekil 6. 1.Senaryonun Kompresörün Performans Verileri

Dış Sıcaklık: 27°C İç Sıcaklık: -3°C (Kondenzasyon Sıcaklığı: 42°C, Evaporasyon Sıcaklığı: -8°C, SH: 6, SC: 5)										
	Soğutucu Akışkan	Komp. Model	Komp. RPM	Komp. Adet	Kapasite	Komp. Adet	Çekilen Güç	Kapasitesi (kW)	EER (n)	
1. Senaryo	R134A	KS1RW0410NDIC	3552	200,00		71,95	2	400,0	143,9	2,78

Şekil 7. 1.Senaryodaki Kompresörün Diğer Verileri

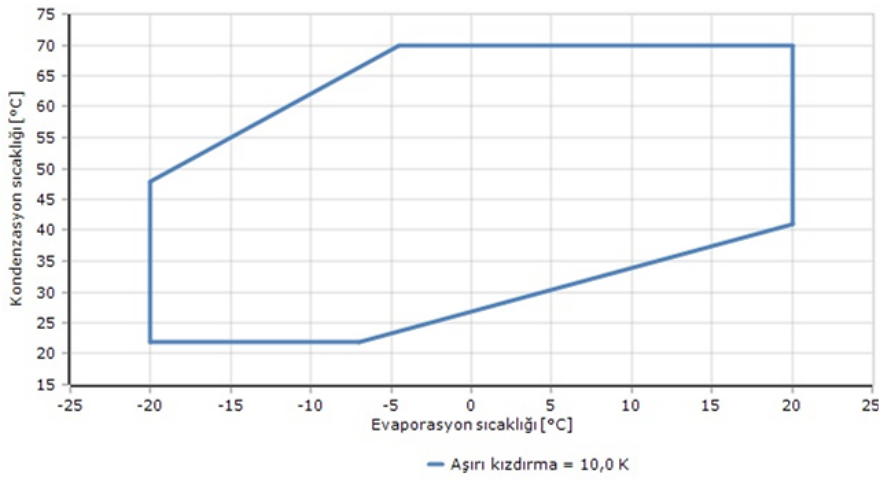
Bu senaryodaki sistem, verilen çalışma koşullarında (27°C dış, -3°C iç) iki adet kompresörle toplam 400 kW soğutma kapasitesi ve 143.9 kW güç tüketimi sağlayarak EER=2,78 değerine ulaşmaktadır; bu sonuçlar sistemin dengeli ve doğru boyutlandırıldığını göstermektedir. Evaporasyon ve kondenzasyon sıcaklıkları ile SH ve SC değerleri de uygun seçilmiş olup sistemin stabil ve verimli çalışmasına olanak tanımaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, seçilen kompresörler ve çalışma parametreleri birbirleriyle uyumlu olup sistem güvenilir bir işletme performansı sunmaktadır.

2. Senaryoda ise KS2RW0560KD4C kodlu kompresör kullanılmıştır. Kullanılan kompresörün değerleri aşağıda gösterilmiştir.



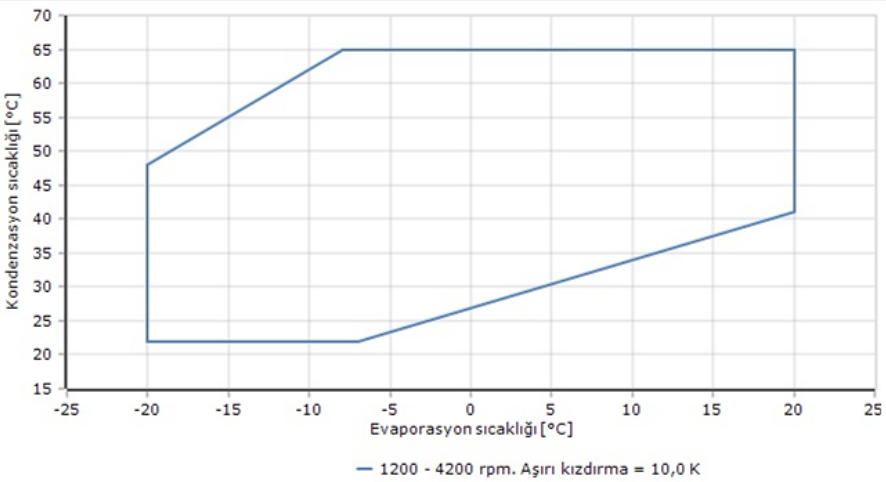
Şekil 8. 2.Senaryonun Kompresörün Çalışma Zarfı

Çalışma zarfı



Şekil 11. 3.Senaryodaki Sabit Kompresörün Çalışma Zarfı

Çalışma zarfı



Şekil 12. 3.Senaryodaki Değişken Hızlı Kompresörün Çalışma Zarfı

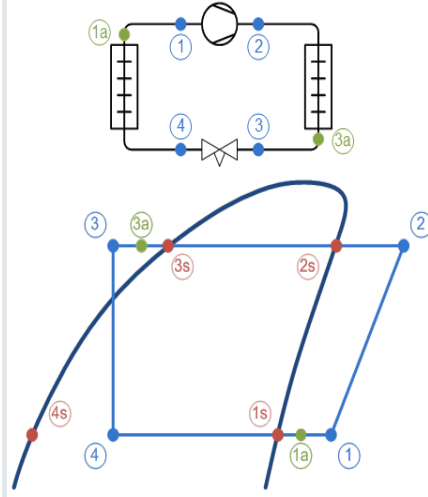
Tüm değerler verilen çalışma koşulları baz alınarak hesaplanmıştır.

Seçili kompresör veya kondenzasyon ünitesi kapasitesi kütle akışını hesaplamakta kullanılır.

Kompresördeki kütleli debi: 6434 kg/h

Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç (a) [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg·K)]
1	Kompresör emişi	-2,0	2,170	10,51	399	1,751
2	Kompresör basması (tahmini)	69,1	10,72	44,95	451,1	1,805
2s	Kondenzasyon çiy noktası	42,0	10,72	52,97	421	1,713
3s	Kondenzasyon kaynama noktası	42,0	10,72	1139	260,2	1,203
3a	Kondenser çıkış	37,0	10,72	1160	252,7	1,179
3	İlave ağır soğutma dahildir	37,0	10,72	1160	252,7	1,179
4	Genleşme valfinden sonra	-8,0	2,170	34,25	252,7	1,199
4s	Evaporasyon kaynama noktası	-8,0	2,170	1321	189,2	0,9601
1s	Evaporasyon çiy noktası	-8,0	2,170	10,82	393,8	1,732
1a	Evaporatör çıkış	-2,0	2,170	10,51	399	1,751

Detaylı log(p)-h diyagramı



Şekil 13. 3.Senaryodaki Sabit Hızlı Kompresörün Performans Verileri

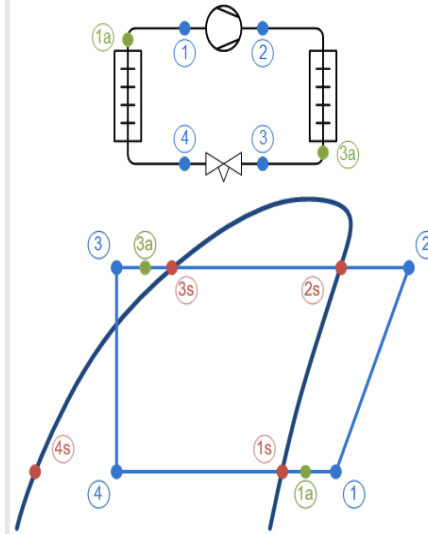
Tüm değerler verilen çalışma koşulları baz alınarak hesaplanmıştır.

Seçili kompresör veya kondenzasyon ünitesi kapasitesi kütle akışını hesaplamakta kullanılır.

Kompresördeki kütleli debi: 3408 kg/h

Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç (a) [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg·K)]
1	Kompresör emişi	-2,0	2,170	10,51	399	1,751
2	Kompresör basması (tahmini)	70,0	10,72	44,75	452,1	1,807
2s	Kondenzasyon çiy noktası	42,0	10,72	52,97	421	1,713
3s	Kondenzasyon kaynama noktası	42,0	10,72	1139	260,2	1,203
3a	Kondenser çıkış	37,0	10,72	1160	252,7	1,179
3	İlave ağır soğutma dahildir	37,0	10,72	1160	252,7	1,179
4	Genleşme valfinden sonra	-8,0	2,170	34,25	252,7	1,199
4s	Evaporasyon kaynama noktası	-8,0	2,170	1321	189,2	0,9601
1s	Evaporasyon çiy noktası	-8,0	2,170	10,82	393,8	1,732
1a	Evaporatör çıkış	-2,0	2,170	10,51	399	1,751

Detaylı log(p)-h diyagramı



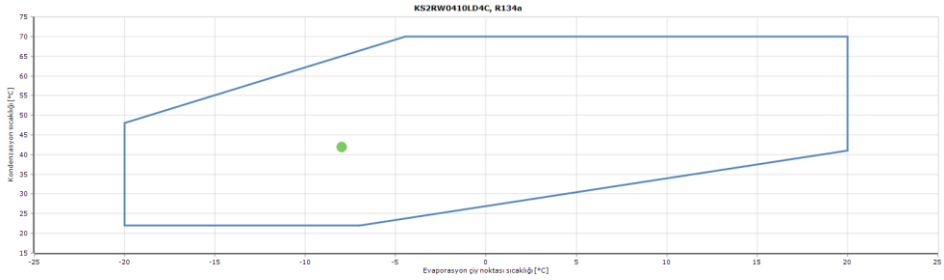
Şekil 14. 3.Senaryodaki Değişken Hızlı Kompresörün Performans Verileri

Dış Sıcaklık: 27°C İç Sıcaklık: -3°C (Kondenzasyon Sıcaklığı: 42°C, Evaporasyon Sıcaklığı: -8°C, SH: 6, SC: 5)								
Soğutucu Akışkan	Komp. Model	Komp. RPM	Komp. Adet Kapasite	Komp. Adet Çekilen Güç	Komp. Adet	Soğutma Kapasitesi (kW)	Çekilen Güç (kW)	EER (n)
3. Senaryo	R134A	KS2RW0640RD4C	3000	261,50	90,26	1	400,0	139,1
		KS1RW0410NDIC	2554	138,50	48,82	1		

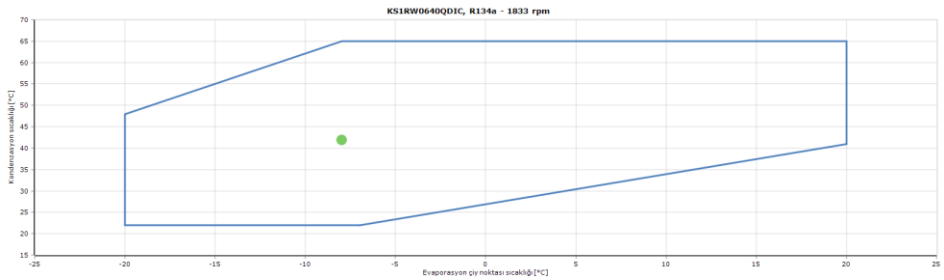
Şekil 15. 3.Senaryodaki Kompresörlerin Diğer Verileri

3.senaryoda sistem, iki farklı kompresörün (KS2RW0640RD4C sabit ve KS1RW0410NDIC değişken) birlikte kullanıldığı bir yapı ile toplam 400 kW soğutma kapasitesi sağlamaktadır; bir kompresör 261.5 kW, diğeri 138.5 kW kapasite üretirken toplam güç tüketimi 139.1 kW olup EER=2,88 değerine ulaşılmaktadır. Bu sonuç, önceki senaryolara kıyasla daha yüksek bir enerji verimliliği sağlandığını ve sistemin daha optimize bir kapasite dağılımı ile çalıştığını göstermektedir. Farklı kapasitelerde kompresörlerin birlikte kullanılması, yükün daha esnek karşılanmasına olanak tanırken aynı zamanda sistem performansını artırarak daha dengeli ve etkin bir işletme sunmaktadır.

4.Senaryoda ise tam tersi olarak yapılmış bir durum söz konusudur. Yani burada hareketli olan kompresörün gücü fazla tutulmuş olup sabit hızlı kompresörün gücü az tutulmuştur.



Şekil 16. 4. Senaryodaki Sabit Hızlı Kompresörün Çalışma Zarfı



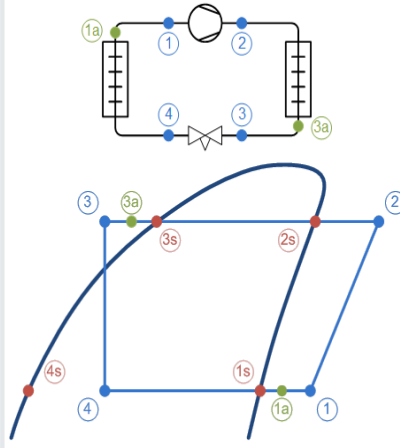
Şekil 17. 4. Senaryodaki Değişken Hızlı Kompresörün Çalışma Zarfı

Tüm değerler verilen çalışma koşulları baz alınarak hesaplanmıştır.
Seçili kompresör veya kondenzasyon ünitesi kapasitesi kütte akışını hesaplamakta kullanılır.

Kompresördaki kütlesel debi: 4088 kg/h

Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç (a) [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg·K)]
1	Kompresör emişi	-2,0	2,170	10,51	399	1,751
2	Kompresör basması (tahmini)	66,8	10,72	45,49	448,6	1,797
2s	Kondenzasyon çiy noktası	42,0	10,72	52,97	421	1,713
3s	Kondenzasyon kaynama noktası	42,0	10,72	1139	260,2	1,203
3a	Kondenser çıkış	37,0	10,72	1160	252,7	1,179
3	İlave aşırı soğutma dahildir	37,0	10,72	1160	252,7	1,179
4	Genleşme valfinden sonra	-8,0	2,170	34,25	252,7	1,199
4s	Evaporasyon kaynama noktası	-8,0	2,170	1321	189,2	0,9601
1s	Evaporasyon çiy noktası	-8,0	2,170	10,82	393,8	1,732
1a	Evaporatör çıkış	-2,0	2,170	10,51	399	1,751

Detaylı log(p)-h diyagramı



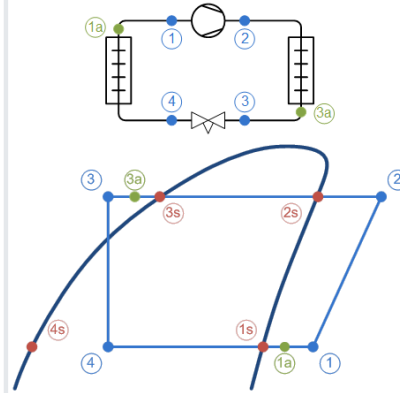
Şekil 18. 4. Senaryodaki Sabit Hızlı Kompresörün Performans Verileri

Tüm değerler verilen çalışma koşulları baz alınarak hesaplanmıştır.
Seçili kompresör veya kondenzasyon ünitesi kapasitesi kütte akışını hesaplamakta kullanılır.

Kompresördaki kütlesel debi: 3408 kg/h

Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç (a) [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg·K)]
1	Kompresör emişi	-2,0	2,170	10,51	399	1,751
2	Kompresör basması (tahmini)	72,6	10,72	44,17	454,9	1,816
2s	Kondenzasyon çiy noktası	42,0	10,72	52,97	421	1,713
3s	Kondenzasyon kaynama noktası	42,0	10,72	1139	260,2	1,203
3a	Kondenser çıkış	37,0	10,72	1160	252,7	1,179
3	İlave aşırı soğutma dahildir	37,0	10,72	1160	252,7	1,179
4	Genleşme valfinden sonra	-8,0	2,170	34,25	252,7	1,199
4s	Evaporasyon kaynama noktası	-8,0	2,170	1321	189,2	0,9601
1s	Evaporasyon çiy noktası	-8,0	2,170	10,82	393,8	1,732
1a	Evaporatör çıkış	-2,0	2,170	10,51	399	1,751

Detaylı log(p)-h diyagramı



Şekil 19. 4. Senaryodaki Değişken Hızlı Kompresörün Performans Verileri

Dış Sıcaklık: 27°C İç Sıcaklık: -3°C (Kondenzasyon Sıcaklığı: 42°C, Evaporasyon Sıcaklığı: -8°C, SH: 6, SC: 5)									
	Soğutucu Akışkan	Komp. Model	Komp. RPM	Komp. Adet	Kapasite	Komp. Adet	Çekilen Güç	Soğutma Kapasitesi (kW)	EER (n)
4. Senaryo	R134A	KS2RW0410LD4C	3000	166,10	54,66	1	400,1	192,7	2,08
		KS1RW0640QD1C	2863	234,00	138,00	1			

Şekil 20. 4. Senaryodaki Kompresörlerin Diğer Verileri

4. senaryo, toplam 400.1 kW soğutma kapasitesi ile diğer senaryolarla benzer kapasiteyi sağlasa da, 192.7 kW çekilen güç ve 2.08 EER değeri ile enerji verimliliği açısından açık biçimde geride kalmaktadır. Buna karşılık 1. senaryo 143.9 kW ve EER 2.78, 2. senaryo 143.3 kW ve EER 2.79, 3. senaryo ise 139.1 kW ve EER 2.88 değerine sahiptir. Bu nedenle aynı kapasiteyi üretmesine

rağmen 4. senaryo çok daha fazla güç tüketmekte, yani en düşük verimli seçenek olarak öne çıkmaktadır; genel sıralama verim açısından 3. senaryo en iyi, ardından 2. ve 1. senaryo gelirken, 4. senaryo son sırada yer almaktadır.

5. SONUÇLAR VE BULGULAR

Bu çalışmada, 27°C dış ortam ve -3°C iç ortam koşullarında çalışan, R134a soğutucu akışkanlı dört farklı kompresör konfigürasyonu enerji performansı, güç tüketimi ve sistem verimliliği açısından karşılaştırılmıştır. Tüm senaryolarda yaklaşık 400 kW soğutma kapasitesi sağlanmış olup, karşılaştırma temel olarak enerji tüketimi ve verimlilik (EER) üzerinden yapılmıştır.

Elde edilen bulgulara göre, sistem performansında en belirleyici parametrenin kompresör seçimi ve kapasite dağılımı olduğu açıkça görülmektedir. 1. ve 2. senaryolar, benzer yapıda olup iki adet eş veya yakın kapasiteli kompresör kullanımı ile dengeli bir performans sunmaktadır. Bu senaryolarda çekilen güç yaklaşık 143–144 kW seviyesinde gerçekleşmiş ve EER değerleri 2.78–2.79 aralığında bulunmuştur. Bu durum, sistemin kararlı çalıştığını ve enerji açısından kabul edilebilir bir verim sunduğunu göstermektedir.

Buna karşılık, 3. senaryo, farklı kapasitelerde iki kompresörün birlikte kullanıldığı bir yapı ile dikkat çekmektedir. Bu senaryoda toplam güç tüketimi 139.1 kW ile en düşük seviyede gerçekleşmiş ve EER değeri 2.88 ile en yüksek verim elde edilmiştir. Kapasitenin iki farklı kompresör arasında dağıtılması, sistemin yükü daha esnek ve optimize şekilde karşılamasına olanak tanımış, bu da enerji performansını olumlu yönde etkilemiştir. Bu durum, özellikle değişken yük koşullarında çalışan soğuk hava depoları için önemli bir avantaj sağlamaktadır.

4. senaryo ise aynı toplam kapasiteyi sağlamasına rağmen 192.7 kW gibi oldukça yüksek bir güç tüketimi ile diğer senaryolardan belirgin şekilde ayrılmaktadır. Bu senaryoda elde edilen EER değeri 2.08 olup, diğer seçeneklere göre oldukça düşük bir verim söz konusudur. Bu durum, seçilen kompresörlerin çalışma noktalarının sistem koşullarıyla tam uyumlu olmadığını ve enerji tüketiminin optimize edilemediğini göstermektedir.

Enerji maliyeti açısından değerlendirildiğinde, kompresör gücündeki farkların uzun vadede önemli ekonomik sonuçlar doğuracağı açıktır. Örneğin, 3. senaryo ile 4. senaryo arasında yaklaşık 50 kW'lık bir güç farkı bulunmaktadır. Bu fark, sistemin yıllık çalışma süresi dikkate alındığında ciddi bir enerji tüketimi ve işletme maliyeti artışı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, ilk yatırım maliyeti benzer olsa dahi işletme sürecinde enerji verimliliği yüksek olan sistemlerin tercih edilmesi ekonomik açıdan daha avantajlıdır.

Genel değerlendirme sonucunda, dört senaryo arasında en uygun ve verimli çözümün 3. senaryo olduğu belirlenmiştir. Bu senaryoyu sırasıyla 2. ve 1. senaryolar takip etmekte olup, bu iki seçenek de dengeli ve kabul edilebilir performans sunmaktadır. 4. senaryo ise düşük enerji verimliliği nedeniyle en son tercih edilmesi gereken seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, soğuk hava deposu tasarımında yalnızca kapasite değil, aynı zamanda kompresör konfigürasyonu ve enerji verimliliği kriterlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği, doğru ekipman seçiminin hem teknik performansı hem de işletme maliyetlerini doğrudan etkilediği bu çalışma ile ortaya konulmuştur.

6. KAYNAKÇA

- [1] International Energy Agency (IEA). (2025). *Energy Efficiency 2025: Industry*. Paris: IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/industry>
- [2] United States Department of Energy (DOE). (2003). *Improving Compressed Air System Performance: A Sourcebook for Industry* (2nd ed.). Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- [3] Compressed Air Challenge. (2021). *Fundamentals of Compressed Air Systems*. Wayne, PA: Compressed Air Challenge.
- [4] Chicago Pneumatic. (2026). *Variable Speed Drive Air Compressors*. Retrieved from <https://compressors.cp.com/en-sea/expert-corner/blog/variable-speed-drive-air-compressors0>
- [5] International Energy Agency (IEA). (2025). *COP28: Tracking the Energy Outcomes*. Paris: IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/topics/cop28-tracking-the-energy-outcomes>
- [6] Compressed Air and Gas Institute (CAGI). (2021). *Compressed Air System Best Practices Manual*. Cleveland, OH: CAGI.
- [7] Atlas Copco. (2024). *Compressed Air Manual* (11th ed.). Stockholm: Atlas Copco AB.
- [8] International Organization for Standardization (ISO). (2010). *ISO 8573-1: Compressed Air – Contaminants and Purity Classes*. Geneva: ISO.
- [9] United States Department of Energy (DOE). (2003). *Improving Compressed Air System Performance: A Sourcebook for Industry* (2nd ed.). Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- [10] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2022). *ASHRAE Handbook – Refrigeration*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- [11] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). *Cold Storage and Refrigeration in Food Processing Systems*. Rome: FAO.
- [12] Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.

3. Bölüm

Tarım Topraklarındaki Ağır Metal Kirliliğinin Potansiyel Ekolojik Riskinin Değerlendirilmesi

Nevin KONAKCI¹

Özet

Ağır metaller düşük konsantrasyonlarda bile toksik özellik gösterirler. Tarım topraklarında yüksek konsantrasyonlarda bulunması durumunda ciddi problemlere sebep olmaktadır. Mahsul sağlığını bozup dolayısıyla canlıların da zarar görmesine sebep olmaktadır. Çeşitli endeksler kullanılarak bölgedeki tarım topraklarının kirlilik dereceleri belirlenmektedir. Bu şekilde sonuçlara göre kirlilik haritaları oluşturulmaktadır. Günümüzde tarım topraklarındaki ağır metal kirliliği çalışmaları sürekli artmaktadır. Bu tür çalışmaların yapılması halk sağlığı açısından oldukça önemlidir.

Anahtar kelimeler: Tarım toprakları, ağır metal, potansiyel ekolojik risk

1. Giriş

Ağır metaller, geçiş metalleri, metaloidler, lantanitler ve aktinitleri içeren metalik özelliklere sahip bir element grubunu temsil eder (Singh vd., 2011). Ağır metaller, yüksek yoğunluklara sahip olup, düşük konsantrasyonlarda bulunsalar dahi toksik özellik gösterirler. Ağır metaller yerkabuğunda genellikle silikat, karbonat ve sülfür şeklinde bulunurlar (Okçu vd., 2009; Kırat, 2023).

Kobalt, bakır, demir, manganez, molibden, selenyum ve çinko iz elementlerinin konsantrasyonları, hücre fonksiyonu için potansiyel bir risk oluşturdıkları için bağlayıcı proteinlerle etkileşimler yoluyla sıkı bir şekilde düzenlenir (Theron vd., 2012). Arsenik (As), Cd, Pb, civa (Hg), plütonyum (Pu), tungsten (W) ve vanadyum (V) ise güçlü toksinler olan ve iyonik yük gibi fizikokimyasal özellikleri nedeniyle doku hücrelerine nüfuz eden, hayati öneme sahip olmayan ağır metallerdir (Duce ve Bush, 2010). Hayati öneme sahip olmayan metaller, canlı organizmalarda herhangi bir temel işlevi yerine getirmedikleri, düşük maruz kalma seviyelerinde bile oldukça toksik oldukları ve yaşam formları için büyük bir tehdit olarak kabul edildikleri için özel bir dikkat gerektirir (Atobatele ve Olutona, 2015). Bu durum, çevre koruma kuruluşları tarafından da doğrulanmaktadır; bu kuruluşlar, As, Cd, Pb ve Hg' nin çevredeki en zehirli metaller arasında olduğunu belirtmektedir (Goyer, 2004). Zehirli Maddeler ve Hastalık Kayıt Ajansı (ATSDR, 2007), belirgin toksisiteye sahip 20'den fazla ağır metali listelemektedir; bunlardan dördü insan sağlığı açısından özellikle endişe vericidir: As, Pb, Cd ve Hg. Bu dört elementten As, akut ağır metal zehirlenmesinin en yaygın nedenidir ve bu nedenle ATSDR listesinde birinci sırada yer almaktadır; Pb ikinci, Cd ise yedinci sırada yer almaktadır (Fay ve Mumtaz, 1996; Flora vd., 2011; Zhyrgalova vd. 2024).

Ağır metaller, toprakta yüksek konsantrasyonlarda bulunduklarında mahsul sağlığını ve verimliliğini olumsuz etkileyebildikleri için tarımsal toprak kirleticileri olarak da kabul edilir (Maksymiec, 2007; Shahid vd., 2015). Ağır metaller bitkiler tarafından özümrlenmez veya sızıntı yoluyla ortadan kaldırılmazsa, toprakta birikip uzun süre kalabilirler. Ayrıca bozulmaya karşı da dirençlidirler (Ali vd., 2019; Rashid vd., 2023). En değerli doğal kaynaklarımızdan biri olan tarım arazisi, hem halkımızın devam eden refahı hem de küresel ekonomi için hayati önem taşır. Yaratılamayan veya yenilenemeyen tek kaynak olması, önemini açıklar (Ozkan vd., 2017). Yüksek konsantrasyonlardaki ağır metaller, tarımsal toprakları kirletir ve gıda zincirini tehlikeye atabilir (Akande vd., 2017; Akuru vd., 2025).

Ağır metaller toksik, kalıcı ve biyolojik olarak parçalanamaz oldukları için toprakta ağır metal birikimi, ekosistemler ve insan sağlığı için büyük riskler oluşturur (Marchant vd., 2017; Li vd., 2021). Bu nedenle, hem halk sağlığının

korunması hem de odaklanmış kirlilik azaltma stratejilerinin oluşturulması için toprak ağır metal kirliliğinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gereklidir (Liang vd., 2023; Song vd., 2025). Tarım topraklarındaki ağır metallerin kaynağı jeojenik ve/veya antropojenik olabilir. Toprağı oluşturan ana madde, jeojenik kirliliğin tek kaynağıdır. Aşırı gübre ve pestisit kullanımı, fosil yakıt kullanımı, madencilik faaliyetleri, hızlı nüfus artışı ve bunun sonucunda kentleşme, kontrolsüz atık su deşarjı, atmosferik birikim, trafik sıkışıklığı ve artan endüstriyel faaliyetler, tarım topraklarındaki antropojenik kirliliğin ana kaynaklarını oluşturmaktadır (Chary vd., 2008; Zhao vd., 2008; Cai vd., 2009; Li vd., 2009; Özkul vd., 2018). Metallerin çevreye olası göçü, bunların tarım topraklarında birikmesini ciddi bir sorun haline getirmektedir; bu durum yeraltı suyunu kirletebilir ve nihai ürünün kalitesini düşürebilir (Aytop vd., 2023; Yıldız ve Özkul, 2024). Üst toprak katmanları metalleri bağlayan organik madde içerdiğinden, ağır metal birikimi öncelikle burada gerçekleşir (Zhang vd., 2020; Li vd., 2021). Bu alanlarda yetişen bitkiler tarafından emilen ağır metaller, uzun süreler boyunca üst toprak katmanlarında kalabilir (Khalid vd., 2017; Wang vd., 2017).

Ağır metallerce artan toprak kirliliği oldukça önemlidir ve tarım, kentleşme ve sanayileşme gibi çeşitli uygulamalar, topraktaki ağır metal konsantrasyon seviyelerinin artmasından sorumludur (Keshavarzi ve Kumar, 2019a). Bu nedenle, toprak kirliliği son yıllarda bölgesel kalkınma ve insan sağlığı için önemli bir engel haline gelmiştir (Jiang vd., 2017; Sakai vd., 2017; Tepanosyan vd., 2017; Eziz vd., 2018; Wu vd., 2018). Çevreye doğal ve insan kaynaklı kaynaklardan giren ağır metaller, çevrede uzun süre kalıcılıkları, biyolojik birikimleri ve akut ve kronik toksisite etkileri nedeniyle insanlar ve tüm ekosistem için önemli potansiyel riskler oluşturmaktadır (Jiang vd., 2017; Zhu vd., 2017; Wu vd., 2018). Bu nedenle, son yıllarda araştırmacılar tarafından ekolojik ve sağlık risklerinin yanı sıra ağır metallerin çevresel dağılımı ve kirliliğine odaklanan daha fazla çalışma yürütülmüştür (Tepanosyan vd., 2017; Doabi vd., 2018; Eziz vd., 2018; Wu vd., 2018, 2019; Sun vd., 2018).

Bilinçsiz tarım uygulamaları nedeniyle topraklardaki ağır metal seviyelerinin sürekli artışı insan sağlığı üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir. Tarım topraklarındaki ağır metal kirliliğinin ana kaynakları aşırı gübreleme ve pestisitler, standart altı gübre ve kompost, atık su ile sulama ve endüstriyel faaliyetlerdir (Dayani ve Mohammadi, 2010; Çolak, 2012; Bolan vd., 2013; Borgese vd., 2013; Ji vd., 2013; Keshavarzi ve Kumar, 2019b). Toprak-bitki örtüsü ekosisteminde biriken metaller, katı halden biyometilasyon yoluyla iyonik parçalara veya organometalik parçalara dönüştürülür. Dolayısıyla, ağır metaller besin zinciri yoluyla hayvanlara, insanlara ve tüm ekolojik çevreye potansiyel riskler

oluşturabilir (Mamut ve ark., 2017; Eziz ve ark., 2018). Bu nedenle, toprakta bulunan ağır metaller üzerine yapılan araştırmalar coğrafi ve çevresel araştırmalarda son derece önemlidir (Baltas vd., 2020). Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Birleşmiş Milletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA) ve Toprak kirliliğinin kontrolü yönetmeliğine göre belirlenen ağır metal sınır değerleri tablo 1’ de görülmektedir.

Tablo 1. Topraktaki ağır metal sınır değerleri (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2001; USEPA, 1996; Chiroma vd., 2014; Can, 2021)

Elementler	Dünya Sağlık Örgütü (WHO) (mg/kg)	Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği Ph>6 (mg/kg)	Birleşmiş Milletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA) (mg/kg)
Cr	100	100	3000
Mn	2000	-	-
Co	50	20	-
Ni	50	75	75
Cu	100	140	4300
Zn	300	300	7500
As	20	20	75
Se	-	5	100
Cd	3	3	85
Ba	-	200	-
Tl	-	1	-
Pb	100	300	420
U	-	5	-

Dünya genelinde tarım topraklarındaki ağır metal kirliliği çalışmaları gittikçe artmaktadır. Literatürden derlenen çalışmalardan alınan analiz sonuçları tablo 2’ de görülmektedir.

Tablo 2. Tarım topraklarındaki ağır metal içeriğinin (mg kg^{-1}) literatür analizi.

	As	Ni	Co	Cu	Cr	Pb	Zn
Bhuiyan vd. 2010	17,55	-	-	-	-	95,0	296,0
Özkul vd. 2018	37.91	117.19	-	22.51	63.69	20.80	54.58
Huang vd. 2019	10,80	28,40	-	28,40	62,40	-	83,40
Baltas vd., 2020	5.66	85.02	-	43.19	194.73	17.01	65.10
Yuan vd., 2021	8,45	27,67	-	25,73	66,81	-	83,87

Yang vd., 2022	7.06	72.47		33.43	156.88	19.48	67.51
Rastegari Mehr vd., 2021	6.93	148.06	-	20.82	115.76	11.45	72.59
Bibi vd., 2023		28,0	7,7	25,0	19,0	25,0	78,0
Xia vd., 2024	-	22.6	7.9	44.0	75.3	0.63	189,0
Zhyrgalova vd., 2024	3.2	17.1	-	32.5	-	7.6	85.7
Nde vd., 2024	0.80	14.52	-	7.52	25.46	-	22.35
Konakçı vd. 2026	38,9	2003,0	159,0	1220,0	823,0	56,9	206,0
Taghavi vd., 2024	5.49	466.26	-	-	120.85	12.01	-
Liu vd., 2024	-	28,29	-	75,06	-	125,06	377,40
Li vd., 2025	26,38	115,89	-	123,54	205,36	244,18	232,27

2. Toprak Kirlilik Seviyelerinin Değerlendirilmesi

Toprak ekolojik ortamını ve insan sağlığını korumak için toprak metal kirliliğini sistematik olarak değerlendirmek amacıyla çeşitli endeksler önerilmiştir. Çevredeki ağır metal birikiminden kaynaklanan kirlenme derecesinin değerlendirilmesinde temel olarak şu parametreler kullanılır, bu parametreler çevredeki kirlilik seviyesinin göstergeleridir:

2.1. Zenginleşme Faktörü (EF)

Zenginleştirme faktörü (EF), toprak örneklerindeki olası ağır metal kirliliğini belirlemek için kullanılır. EF, metal kaynağının jeojenik veya antropojenik olduğunu belirlemede kullanılan bir parametredir (Özkul, 2016). Bu parametre hesaplanırken, üst topraktaki bir metal konsantrasyonunun normalizasyonu ile toprakta stabil olan bir referans element konsantrasyonu bulunur (Barbieri 2016). En sık kullanılan referans elementler Al, Ti, Mn, Sc, Si, Sr, Fe, K ve Zr' dir (Reimann ve Caritat, 2000; Yıldız ve Ozkul, 2024).

Böylece, EF aşağıdaki ilişki kullanılarak hesaplanır (Bhuiyan vd., 2010):

$$EF = (C_n / C_{ref})_{örnek} / (B_n / B_{ref})_{referans}$$

C_n : Çalışma alanındaki ilgili ağır metalin konsantrasyonu,

C_{ref} : Referans ağır metalin konsantrasyonu

B_n : Ağır metalin topraktaki ortalama değeri

B_{ref} : Referans ağır metalin topraktaki ortalama değeri

EF değerine göre EF sınıflaması Tablo 3’ de görüldüğü gibi 5 sınıfa ayrılmıştır (Sutherland, 2000).

Tablo 3. Zenginleşme Faktörü

Sınıf	EF değeri	EF sınıflaması
1	$EF < 2$	Minimal zenginleşme
2	$2 \leq EF \leq 5$	Orta düzeyde zenginleşme
3	$5 \leq EF \leq 20$	Önemli zenginleşme
4	$20 \leq EF \leq 40$	Çok yüksek zenginleşme
5	$EF > 40$	Son derece yüksek zenginleşme

2.2. Jeoakümülayon İndeksi (I_{geo})

Jeo-birikim indeksi (I_{geo}), topraklardaki ağır metal kirliliğinin derecesini niceliksel olarak değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Deng vd., 2024). Bu yöntem, doğal jeolojik süreçlerin arka plan değerleri üzerindeki etkisini dikkate almakla kalmaz, aynı zamanda insan faaliyetlerinin etkisini de tam olarak hesaba katar. I_{geo} ' yu hesaplama formülü aşağıdaki gibidir:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right)$$

Burada C_n , topraktaki ağır metallerin ölçülen konsantrasyonunu temsil eder, B_n ise ağır metaller için jeokimyasal arka plan değeridir ve 1.5; jeolojik varyasyonlar nedeniyle arka plan değerindeki dalgalanmaları hesaba katmak için kullanılan bir düzeltme faktörüdür; böylece antropojenik etkilerin belirlenmesine yardımcı olur (Deng vd., 2024). Toprak kirliliği, Tablo 4’ de görüldüğü gibi I_{geo} değerlerine göre kirlilik derecesi bakımından yedi sınıfa ayrılmıştır (Taghavi vd., 2024):

Tablo 4. Jeoakümülayon İndeksi

Değer	Kirlilik Derecesi
$I_{geo} \leq 0$	Kirlenmemiş toprak
$0 \leq I_{geo} < 1$	Kirlenmemiş-orta derecede kirlenmiş toprak
$1 \leq I_{geo} < 2$	Orta derecede kirlenmiş toprak
$2 \leq I_{geo} < 3$	Orta-ağır derecede kirlenmiş toprak
$3 \leq I_{geo} < 4$	Aşırı derecede kirlenmiş toprak
$4 \leq I_{geo} < 5$	Ağır derecede kirlenmiş toprak
$I_{geo} \geq 5$	

2.3. Kirlilik Faktörü (CF) ve Kirlilik Yük İndeksi (PLI)

CF, topraktaki her bir metalin konsantrasyonunun, temel veya arka plan değerine (kirlenmemiş topraktaki konsantrasyon) bölünmesiyle elde edilen orandır (Bhuiyan vd., 2010):

CF, aşağıdaki denklem (Brooks 1972) kullanılarak hesaplanır:

$$CF = C_{metal} / C_0$$

Formülde, C_{metal} : Toprak örneğindeki metal konsantrasyonu; C_0 : Metalin topraktaki ortalama değeri olarak kullanılmaktadır. Kirlilik Faktörü Tablo 5’ de görüldüğü gibi 4 sınıfa ayrılmıştır (Vineethkumar vd., 2020; Taghavi vd., 2024). En yüksek sayı, metal konsantrasyonunun kabukta beklenenden 100 kat daha fazla olduğunu gösterir (Bhuiyan vd., 2010).

Tablo 5. Kirlilik Faktörü

CF Değeri	Kirlilik Derecesi
$CF < 1$	Düşük kirlilik
$1 < CF < 3$	Orta düzeyde kirlilik
$3 < CF < 6$	Önemli kirlilik
$CF > 6$	Çok yüksek kirlilik

Kirlilik yükü indeksi (PLI), Tomlinson vd. (1980) tarafından önerildiği gibi, analiz edilen metaller tarafından toprak kirliliğinin derecesini belirlemek için kullanılır. Kirlilik yükü indeksi (PLI), aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$PLI = \sqrt[n]{(CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n)}$$

PLI değeri, CF' nin kirlilik faktörü ve n' nin metal sayısı olarak hesaplandığı bir değerdir. PLI değerine göre toprak kirliliği sınıfları Tablo 6' da listelenmiştir

(Taghavi vd., 2024). Bu endeks, ağır metal kirliliğinin seviyesini değerlendirmek için basit ve karşılaştırmalı bir yöntem sunmaktadır (Bhuiyan vd., 2010).

Tablo 6. Kirlilik Yük İndeksi

PLI Değeri	Kirlilik Derecesi
$PLI < 1$	Kirlenmemiş toprak
$1 \leq PLI < 2$	Kirlenmemiş-orta derecede kirlenmiş topraklar
$2 \leq PLI < 3$	Orta derecede-şiddetli derecede kirlenmiş toprak
$PLI \geq 3$	Şiddetli derecede kirlenmiş toprak

2.4. Ekolojik risk faktörü (E_r^i)

Belirli bir tek kirleticinin potansiyel ekolojik riski, ekolojik risk faktörü (E_r^i), Hakanson (1980) tarafından önerilen aşağıdaki denklem (Tablo 7) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$C_f^i = C_s^i / C_f^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

Burada T_r^i = belirli bir maddenin toksik tepki faktörü; C_f^i ise kirlenme faktörüdür. Hakanson'a (1980) göre, E_r^i değerlerine dayanarak beş kategori ekolojik risk önerilmiştir (Tablo 7).

2.5. Potansiyel ekolojik risk endeksi

Potansiyel ekolojik risk endeksi, kirlilik derecesini belirler ve aşağıda verilen denklemden de anlaşılacağı gibi ekolojik risk faktörlerinin (E_r^i) toplamıdır:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

Burada Eri ekolojik risk faktörünü, m ise ağır metal türlerinin sayısını ifade etmektedir. Hakanson'a (1980) göre, risk indeksi (RI) değerlerine dayanarak dört kategori önerilmiştir (Tablo 7) (Ullah vd., 2020).

Tablo 7. Ağır metallerden kaynaklanan potansiyel çevresel riskin derecelendirme standartları.

E_r^i	Potansiyel Ekolojik Risk	RI*	Potansiyel Ekolojik Risklerin Toplamı
$E_r^i < 40$	Düşük risk	$RI < 150$	Düşük risk
$40 \leq E_r^i < 80$	Orta düzeyde risk	$150 \leq RI < 300$	Orta düzeyde risk
$80 \leq E_r^i < 160$	Önemli risk	$300 \leq RI < 600$	Önemli risk
$160 \leq E_r^i < 320$	Yüksek risk	$RI > 600$	Yüksek risk
$E_r^i > 320$	Çok yüksek risk		

2.6. İnsan sağlığı risk değerlendirmesi

2.6.1. Ortalama günlük doz

Tarım topraklarında, ağır metallere maruz kalma yutma, solunum ve deri yoluyla gerçekleşebilir. Çocuklarda (6 yaş) ve yetişkinlerde (25 yaş) ayrı ayrı, her bir maruz kalma yoluyla toprağa ağır metaller (Cd ve Pb) için ortalama günlük doz (ADD) ($\text{mg kg}^{-1} \text{ gün}^{-1}$) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır: Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA 1989, 1996) tarafından önerilen denklemler:

$$\begin{aligned}
 &\text{Ortalama Günlük Doz Alımı (ADD}_{\text{ing}}) \\
 &= C \times EF \times ED \times R_{\text{ing}} \times 10^{-6} / BW \times AT \\
 &\text{Ortalama Günlük Doz İnhalasyon (ADD}_{\text{inh}}) \\
 &= C \times EF \times ED \times R_{\text{inh}} \times 10^{-6} / PEF \times BW \times AT \\
 &\text{Ortalama Günlük Doz İnhalasyon (ADD}_{\text{derm}}) \\
 &= C \times SL \times SA \times ABS \times EF \times ED \times 10^{-6} / BW \times AT
 \end{aligned}$$

Burada ADD_{ing} , ADD_{inh} ve ADD_{derm} sırasıyla yutma, solunum ve dermal maruz kalma yolları için ortalama günlük dozları, C = ağır metallerin konsantrasyonu (mg kg^{-1}), EF = maruz kalma sıklığı (gün yıl^{-1}), ED = maruz kalma süresi (yıl), R_{ing} = yutma oranı (mg gün^{-1}), BW = vücut ağırlığı (kg), AT = ortalama süre (gün), R_{inh} = solunum oranı ($\text{m}^3 \text{ gün}^{-1}$), PEF = özgül emisyon faktörü ($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$), SL = cilt yapışma faktörü (mg cm^{-2}), SA = maruz kalan cilt alanı (cm^2) ve ABS = dermal emilim faktörü (Ullah vd., 2020)

2.6.2. Tehlike katsayısı

USEPA'ya (2010) göre, HQ aşağıdaki denkleme göre tahmin edilmiştir:

$$HQ = ADD / RfD$$

ADD = farklı maruz kalma yolları için ortalama günlük doz ($\text{mg kg}^{-1} \text{gün}^{-1}$)
ve RfD = referans doz ($\text{mg kg}^{-1} \text{gün}^{-1}$) anlamına gelir (Ullah vd., 2020).

2.6.3. Toplam tehlike endeksi

Toplam tehlike endeksi (THI), toprak örneklerinde belirlenen ve her bir ağır metal için HQ'nun toplamı olarak ifade edilen, ağır metallerin karışımının oluşturduğu genel potansiyel risklerdir (USEPA 1989):

$$THI = \sum HQ$$

Buna göre, THI değeri $\leq 1,0$, önemli katkısız veya toksik etkileşimlerin meydana gelmeyeceğini ve daha fazla değerlendirmeye gerek olmadığını gösterir. Bununla birlikte, THI > 1,0 potansiyel sağlık sorunları açısından ciddi bir endişe kaynağıdır (USEPA 1989; Ullah vd., 2020).

3. Sonuçlar

Ağır metaller nihayetinde besin zinciri yoluyla hem insanlar hem de hayvanlar tarafından tüketilir. Sonuç olarak, gıda ve topraktaki ağır metaller hem insanları hem de hayvanları doğrudan etkiler (Zheng vd., 2010; Akbay vd., 2023). Ağır metaller, son derece toksik, biyolojik olarak parçalanamaz ve besin zinciri boyunca biyolojik olarak biriktikleri için ekolojik süreçler, gıda güvenliği ve insan sağlığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Pandey vd., 2003; Yang vd., 2019; Zhao vd., 2020). Bu nedenle, topraktaki ağır metal kirliliğini değerlendirmek, çevresel ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini göz önünde bulundurmak ve kirlilik kaynaklarını niceliksel olarak belirlemek çok önemlidir (Jiang vd., 2020; Fei vd., 2022). Toprakta ağır metallerin birikmesi, özellikle hızla kentleşen ve sanayileşen gelişmekte olan ülkelerde son on yıllarda önemli bir çevre sorunu haline gelmiştir. Dünyanın dört bir yanından araştırmacılar bu olaya büyük ilgi göstermiştir (Pandey vd., 2003; Yang vd., 2019; Zhao vd., 2020). Ekolojik risklerin azaltılması özellikle tarımın gelişmesi için önemlidir. Bu nedenle, topraktaki ağır metal kirliliğini değerlendirmek, bunun çevre ve insan sağlığı üzerindeki sonuçlarını göz önünde bulundurmak ve kirlilik kaynaklarını niceliksel olarak tanımlamak gereklidir (Grandclement vd., 2017; Varol vd., 2021; Akbay vd., 2023).

Kaynakça

- Akande, F.O. and Ajayi, S.A. 2017. Assessment of heavy metals level in soil and vegetables grown in peri-urban farms around Osun State and the associated human health. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)*, 2(6), 3250-3261.
- Akbay, C., Aytop, H., Dikici, H. 2023. Evaluation of radioactive and heavy metal pollution in agricultural soil surrounding the lignite-fired thermal power plant using pollution indices. *Int. J. Environ. Health Res.*, 33, 1490–1501.
- Akuru, U.B., Nwachoko, N., Tetam, J.B., Jamabo, M., Amadi, C.S., Peter-Osah, E. 2025. *Asian Journal of Environment & Ecology Exploring the Levels of Heavy Metals in Soil: A Case Study of Ahoada West Local Government Area in Rivers State, Nigeria*. *Asian J. Env. Ecol.*, 24 (2), 9-18.
- Ali, H., Khan, E., Ilahi, I. 2019. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity and Bioaccumulation, *J. Chem.*, 6730305.
- Atobatele, O.E. and Olutona, G.O., 2015. Distribution of three non-essential trace metals (cadmium, mercury and lead) in the organs of fish from Aiba reservoir, Iwo, Nigeria. *Toxicology Reports*, 2, 896-903.
- ATSDR. 2007. Toxicological profile for arsenic. Atlanta: U.S. Dept. of Health & Human Services.
- Aytop, H., Koca, Y.K., Şenol, S. 2023. The importance of using soil series-based geochemical background values when calculating the enrichment factor in agricultural areas. *Environmental Geochemistry and Health*, 1-16.
- Baltas, H., Sirin, M., Gökbayrak, E., Özcelik, A.E. 2020. A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop province, Turkey. *Chemosphere*, 241, 125015.
- Barbieri, M. (2016). The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination, *J. Geol. Geophys.*, 5-1.
- Bhuiyan, M.A.H., Parvez, L., Islam, M.A., Dampare, S.B., Suzuki, S., 2010. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *J. Hazard Mater.*, 173, 384–392.
- Bibi, D., Tozser, D., Sipos, B., Tothm eresz, B., Simon, E. 2023. Heavy metal pollution of soil in Vienna, Austria. *Water Air Soil Pollut.*, 23, 232.
- Bolan, N.S., Makino, T., Kunhikrishnan, A., Kim, P.-J., Ishikawa, S., Murakami, M., Naidu, R., Kirkham, M.B., 2013. Cadmium contamination and its risk management in rice ecosystems. *Adv. Agron.* 119, 183e273.
- Borgese, L., Federici, S., Zacco, A., Gianoncelli, A., Rizzo, L., Smith, D.R., Donna, F., Lucchini, R., Depero, L.E., Bontempi, E., 2013. Metal fractionation in soils

- and assessment of environmental contamination in Vallecamonica, Italy. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20, 5067e5075.
- Cai, Q., Long, M.L., Zhu, M., Zhou, Q.Z., Zhang, L., Liu J. 2009. Food chain transfer of cadmium and lead to cattle in a lead–zinc smelter in Guizhou, China. *Environ Pollut.*, 157, 3078–3082.
- Can, E. 2021. Nevşehir organize sanayi bölgesi topraklarında ağır metal kirliliğinin belirlenmesi ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile mekânsal analizi, Nevşehir Hacı Yer Bilimleri ve Mühendisliği Değerlendirmeleri 41 Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, s. 1-3, Nevşehir.
- Chary, S., Kamal, C.T., Raj, D.S.S. 2008. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer. *Ecotoxicol Environ Safety*, 69, 513–24.
- Chiroma, T. M., Ebewe, R. O., Hymore, F.K., (2014). Comparative Assesment of Heavy Metal Levels in Soil, Vegetables and Urban Grey Waste Water used for Irrigation in Yola and Kano. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 3(2), 1-9.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Toprak Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 2001.
- Çolak, M., 2012. Heavy metal concentrations in sultana-cultivation soils and sultana raisins from Manisa (Turkey). *Environ. Earth Sci.* 67, 695e712.
- Dayani, M., Mohammadi, J., 2010. Geostatistical assessment of Pb, Zn and Cd contamination in near-surface soils of the urban-mining transitional region of Isfahan, Iran. *Pedosphere* 20, 568e577.
- Deng J., Yu J., Wang X., Yu D., Ma H., Wu Y., Yu C., Pu S., 2024. Spatial distribution and migration characteristics of heavy metals at an abandoned industrial site in the southwest of China. *Journal of Hazardous Materials*. 480, 136447. doi:10.1016/j.jhazmat.2024.136447.
- Doabi, S.A., Karami, M., Afyuni, M., Yeganeh, M., 2018. Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil, atmospheric dust and major food crops in Kermanshah province, Iran. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 163, 153e164.
- Duce, J.A. and Bush, A.I., 2010. Biological metals and Alzheimer’s disease: implications for therapeutics and diagnostics. *Progress in Neurobiology*, vol. 92, no. 1, pp. 1-18.
- Eziz, M., Mohammad, A., Mamut, A., Hini, G., 2018. A human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils of Yanqi Basin, Silk Road Economic Belt, China. *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.* 24, 1352e1366.
- FAO/WHO. Joint FAO/WHO, 2021. Food Standards Programme Codex Committee on Contaminants in Foods. CF/14 INF/1. Fourteenth Session; CODEX Alimentarius Commission: Rotterdam, The Netherlands, 1–190.

- Fay, R.M. and Mumtaz, M.M., 1996. Development of a priority list of chemical mixtures occurring at 1188 hazardous waste sites, using the HazDat database. *Food and Chemical Toxicology*, vol. 34, no. 11-12, pp. 1163-1165. [http://dx.doi.org/10.1016/S0278-6915\(97\)00090-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0278-6915(97)00090-2). PMID:9119332.
- Fei, X., Lou, Z., Xiao, R., Ren, Z., Lv, X. 2022. Source analysis and source-oriented risk assessment of heavy metal pollution in agricultural soils of different cultivated land qualities. *J. Clean Prod.*, 341, 130942.
- Flora, S.J.S., Pachauri, V. and Saxena, G., 2011. Arsenic, cadmium and lead: reproductive and developmental toxicology. London: Academic Press.
- Goyer, R., 2004. Issue paper on the human health effects of metals. Washington, DC: US Environmental Protection Agency.
- Grandclement, C., Seyssiecq, I., Piram, A., Wong-Wah-Chung, P., Vanot, G., Tiliacos, N., Roche, N., Doumenq, P. 2017. From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes, the evaluation of organic micropollutant removal: a review. *Water Res.*, 111, 297-317.
- Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic contamination control: a sedimentological approach. *Water Research*, 14 (8), 975-1001.
- Huang, Y., Wang, L., Wang, W., Li, T., He, Z., Yang, X. 2019. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: A meta-analysis, *Sci. Total. Environ.*, 651, 3034–3042.
- Ji, K., Kim, J., Lee, M., Park, S., Kwon, H.-J., Cheong, H.-K., Jang, J.-Y., Kim, D.-S., Yu, S., Kim, Y.-W., 2013. Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near abandoned metal mines in Goseong, Korea. *Environ. Pollut.*, 178, 322e328.
- Jiang, Y., Chao, S., Liu, J., Yang, Y., Chen, Y., Zhang, A., Cao, H., 2017. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China. *Chemosphere*, 168, 1658e1668.
- Jiang, H.H., Cai, L.M., Wen, H.H., Hu, G.C., Chen, L.G., Luo, J. 2020. An integrated approach to quantifying ecological and human health risks from different sources of soil heavy metals. *Sci. Total Environ.*, 701, 134466.
- Keshavarzi, A., Kumar, V., 2019a. Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in agricultural soils of Northeastern Iran. *Geol. Ecol. Landscapes*, 00, 1e17.
- Keshavarzi, A., Kumar, V., 2019b. Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils of Northeastern Iran. *Int. J. Environ. Health Res.*, 29, 544e560.
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N.K., Murtaza, B., Bibi, I., Dumat, C. 2017. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *J. Geochem. Explor.*, 182, 247-268.

- Konakci, N., Bacha Simoes, E., Sasmaz Kislioglu, M., Sasmaz, A. 2026. Statistical approach to heavy metal pollution and its consequences in serpentine soils around Alacakaya (Turkey) for a sustainable environment. *Appl. Sci.*, 16(9), 4369.
- Kirat, G. 2023. Investigation of soil pollution with pollution parameters (Erzurum-Moryayla). *Intern. Sci. Vocat. J. (ISVOS Journal)*, 7(1), 1–8. DOI: 10.47897/Bilmes.1125279.
- Li, J.L., He, M., Han, W., Gu, Y. 2009. Analysis and assessment on heavy metal sources in the coastal soils developed from alluvial deposits using multivariate statistical methods. *J. Hazard Mater.*, 164, 976–981.
- Li, X., Geng, T., Shen, W., Zhang, J., Zhou, Y. 2021. Quantifying the influencing factors and multi-factor interactions affecting cadmium accumulation in limestone-derived agricultural soil using random forest (RF) approach. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 209, 111773.
- Li, Y.; Kuang, H.; Hu, C.; Ge, G. 2021. Source Apportionment of Heavy Metal Pollution in Agricultural Soils around the Poyang Lake Region Using UNMIX Model. *Sustainability*, 13, 5272.
- Li, Y., Wang, S., Shang, X., Zhou, H.; He, J., Chen, W., et al., 2025. Characterization and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils in the complex genesis region of western Yunnan. *Sci Rep.*, 15, 32213.
- Liang, J., Liu, Z., Tian, Y., Shi, H., Fei, Y., Qi, J., Mo, L. 2023. Research on health risk assessment of heavy metals in soil based on multi-factor source apportionment: a case study in Guangdong Province, China. *Sci. Total Environ.*, 858, 159991.
- Liu, J., Zheng, Q., Pei, S., Li, J., Ma, L., Zhang, L., Niu, J., Tian, T. 2024. Ecological and health risk assessment of heavy metals in agricultural soils from northern China. *Environ. Monit. Assess.*, 196, 99.
- Maksymiec, W. 2007. Signaling responses in plants to heavy metal stress, *Acta Physiol. Plant.*, 29, 177–187.
- Mamut, A., Eziz, M., Mohammad, A., Anayit, M., 2017. The spatial distribution, contamination, and ecological risk assessment of heavy metals of farmland soils in KarashahareBaghrash oasis, northwest China. *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.* 23, 1300e1314.
- Marchant, B.P., Saby, N.P.A., Arrouays, D. 2017. A survey of topsoil arsenic and mercury concentrations across France. *Chemosphere*, 181, 635–644.
- Nde, S.C., Felicite, O.M., Aruwajoye, G.S., Palamuleni, L.G., 2024. A meta-analysis and experimental survey of heavy metals pollution in agricultural soils. *J. Trace Elem. Min.*, 9, 100180.

- Okcu, M., Tozlu, E., Kumlay, A. M. ve Pehlivan, M. "Ağır Metallerin Bitkiler Üzerine Etkileri". *Alinteri Zirai Bilimler Dergisi*. 17(2), 14-26, 2009.
- Ozkan, A., Ozkan, V., Sungur, S., Birses, H. 2017. Heavy metal pollution around international Hatay airport. *NESciences*, 2 (1), 18–24.
- Özkul, C. 2016. Heavy metal contamination in soils around the Tunçbilek thermal power plant (Kütahya, Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 284.
- Özkul, C., Acar, R.U., Köprübaşı, N., Er, A.E., Kızılkaya, H.İ., Metin, M., Şenel, M.N. 2018. Altıntaş (Kütahya-Türkiye) ovası tarım topraklarında ağır metal kirliliğinin araştırılması, öncel çalışma. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, 17 (1), 13-26.
- Pandey, S., Parvez, S., Sayeed, I., Haque, R., Bin-Hafeez, B., Raisuddin, S. 2003. Biomarkers of oxidative stress: a comparative study of river Yamuna fish Wallago attu (Bl. & Schn.). *Sci. Total Environ.*, 309 (1–3), 105-115.
- Rashid, A., Schutte, B.J., Ulery, A., Deyholos, M.K., Sanogo, S., Lehnhoff, E.A., Beck, L. 2023. Heavy metal contamination in agricultural soil: environmental pollutants affecting crop health. *Agronomy*, 13 (6), 1521.
- Rastegari Mehr, M., Shakeri, A., Amjadian, K., Khalilzadeh Poshtegal, M., Sharifi, R., 2021. Bioavailability, distribution and health risk assessment of arsenic and heavy metals (HMs) in agricultural soils of Kermanshah Province, west of Iran. *J. Environ. Health Sci. Eng.*, 19, 107–120.
- Reimann, C., ve Caritat, P. de (2000). Intrinsic flaws of element enrichment factors (EFs) in environmental geochemistry. *Environmental Science & Technology*, 34, 5084–5091.
- Sakai, N., Alsaad, Z., Thuong, N.T., Shiota, K., Yoneda, M., Mohd, M.A., 2017. Source profiling of arsenic and heavy metals in the Selangor River basin and their maternal and cord blood levels in Selangor State, Malaysia. *Chemosphere* 184, 857-865.
- Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G. Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., Dumat, C. 2015. Heavy metal stress and crop productivity. *Crop production and global environmental issues*, Hakeem, H.R., Ed.; Springer International Publishing: Chem, Switzerland, 1–25.
- Song, X., Sun, Y., Wang, H., Huang, X., Han, Z., Shu, Y., Wu, J., Zhang, Z., Zhong, Q., Li, R., Fan, Z. 2025. Uncovering soil heavy metal pollution hotspots and influencing mechanisms through machine learning and spatial analysis. *Environ. Pollut.*, 370, 125901.
- Sun, L., Sun, C., Liu, F., Bao, X., 2018. Health risk assessment of oral bioaccessibility of heavy metal in soil from coalfield in Huaibei City, China. *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.* 1e11.

- Sutherland, R. A. 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environ. Geol.*, 39, 611–27.
- Taghavi, M., Bakhshi, K., Zarei, A., Hoseinzadeh, E., Gholizadeh, A. 2024. Health risk assessment of heavy metal toxicity in the aquatic environment of the Persian Gulf. *Mar. Pollut. Bull.*, 202.
- Tepanosyan, G., Sahakyan, L., Belyaeva, O., Maghakyan, N., Saghatelian, A., 2017. Human health risk assessment and riskiest heavy metal origin identification in urban soils of Yerevan, Armenia. *Chemosphere* 184, 1230e1240.
- Theron, A.J., Tintinger, G.R. and Anderson, R., 2012. Harmful interactions of non-essential heavy metals with cells of the innate immune system. *Journal of Clinical Toxicology*, vol. S3, pp. 005.
- Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R., Jeffrey, D.W. 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters*, 33, 566.
- Ullah, I., Ditta, A., Imtiaz, M., Mehmood, S., Rizwan, M., Rizwan, M.S., Jan, A.U., Ahmad, I. 2020. Assessment of health and ecological risks of heavy metal contamination: a case study of agricultural soils in Thall, Dir-Kohistan. *Environ. Monit. Assess.* 192 (12), 1–19.
- USEPA. 1989. Risk assessment guidance for superfund. Human Health Evaluation Manual (Part A), I, EPA/540/1–89/002.
- USEPA, 1996. Report: recent Developments for In Situ Treatment of Metals contaminated Soils, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response.
- USEPA. 2010. User's guide (EB/OL). <http://www.epa.gov/>. Accessed 26 Sept 2019.
- Varol, M., Gündüz, K., Sünbül, M.R. 2021. Pollution status, potential sources and health risk assessment of arsenic and trace metals in agricultural soils: a case study in Malatya province, Turkey. *Environ Res.*, 202, 111806.
- Vineethkumar, V., Sayooj, V., Shimod, K., Prakash, V. 2020. Estimation of pollution indices and hazard evaluation from trace elements concentration in coastal sediments of Kerala, Southwest Coast of India. *Bull. Natl. Res. Cent.*, 44, 1-16.
- Wang, Y., Wang, R., Fan, L., Chen, T., Bai, Y., Yu, Q., Liu, Y. 2017. Assessment of multiple exposure to chemical elements and health risks among residents near Huodehong lead-zinc mining area in Yunnan, Southwest China. *Chemosphere*, 174, 613-627.
- Wu, J., Lu, J., Li, L., Min, X., Luo, Y., 2018. Pollution, ecological-health risks, and sources of heavy metals in soil of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chemosphere* 201, 234e242.

- Xia, F., Zhao, Z., Niu, X., Wang, Z., 2024. Integrated pollution analysis, pollution area identification and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soil. *J. Hazard Mater.* 465, 133215.
- Yang, S., He, M., Zhi, Y., Chang, S.X., Gu, B., Liu, X., Xu, J. 2019. An integrated analysis on source-exposure risk of heavy metals in agricultural soils near intense electronic waste recycling activities. *Environ. Int.*, 133, 1058239.
- Yang, J., Sun, Y., Wang, Z., et al., 2022. Heavy metal pollution in agricultural soils of a typical volcanic area: risk assessment and source appointment. *Chemosphere*, 197, 109365.
- Yildiz, U. and Ozkul, C. 2024. Heavy metals contamination and ecological risks in agricultural soils of Uşak, western Türkiye: a geostatistical and multivariate analysis. *Environ. Geochem. Health.*, 46, 58.
- Yuan, X., Xue, N., Han, Z. 2021. A meta-analysis of heavy metals pollution in farmland and urban soils in China over the past 20 years, *Sci. Total. Environ.* 101, 1217–1226.
- Zhang, F., He, Y., Zhao, C., Kou, Y., Huang, K. 2020. Heavy Metals Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Farmland Soils and Agricultural Products in a Mining Area of Henan Province, China. *Pol. J. Environ. Stud.*, 29, 3929-3941.
- Zhao, Y., Xu, X., Sun, W., Huang, B., Darilek, J.L., Shi, X. 2008. Uncertainty assessment of mapping mercury contaminated soils of a rapidly industrializing city in the Yangtze River Delta of China using sequential indicator cosimulation. *Environ. Monit. Assess.*, 138 (1-3), 343–355.
- Zhao, K., Zhang, L., Dong, J., Wu, J., Ye, Z., Zhao, W., Fu, W. 2020. Risk assessment, spatial patterns and source apportionment of soil heavy metals in a typical Chinese hickory plantation region of southeastern China. *Geoderma*, 360, 114011.
- Zheng, N., Liu, J., Wang, Q., Liang, Z. 2010. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China. *Sci. Total Environ.*, 408(4), 726-733.
- Zhyrgalova, A., Yelemessov, S., Ablaihan, B., Aitkhozhayeva, G., Zhildikbayeva, A. 2024. Assessment of potential ecological risk of heavy metal contamination of agricultural soils in Kazakhstan. *Brazilian Journal of Biology*, 84: e280583.
- Zhu, L., Liu, J., Xu, S., Xie, Z., 2017. Deposition behavior, risk assessment and source identification of heavy metals in reservoir sediments of Northeast China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 142, 454e463.

4. Bölüm

Elmasın Mineralojik, Gemolojik Özellikleri, Oluşum Ortamları ve Osmanlı Cevahirnamelerindeki Yeri

Nihal ÇEVİK¹

1. Giriş

Elmas, yalnızca mücevher sektörünün en değerli taşlarından biri değil, aynı zamanda sahip olduğu üstün fiziksel, kimyasal ve optik özellikler nedeniyle bilim ve teknolojinin birçok alanında önemli bir yere sahip doğal bir mineraldir. Saf karbonun kübik kristal sisteminde kristallenmesiyle oluşan elmas, Mohs sertlik ölçeğinde 10 değeri ile en sert doğal mineral olması, yüksek kırılma indisi, yüksek dispersiyonu, üstün ısıl iletkenliği ve kimyasal dayanıklılığı gibi özellikleriyle diğer doğal minerallerden ayrılmaktadır. Ayrıca, tarih boyunca zenginlik, güç ve prestijin simgesi olarak kabul edilmiştir. Günümüzde ise kuyumculuk sektörünün yanı sıra kesici ve delici takımlar, elektronik, optik, ileri malzeme teknolojileri ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu bölümde elmasın mineralojik ve gemolojik özellikleri, jeolojik oluşum ortamları, elmasa benzeyen taşlarla karşılaştırılması ve Osmanlı cevahirnamelerindeki yeri ele alınmaktadır.

2. Elmasın Mineralojik ve Gemolojik Özellikleri

Elmas, sahip olduğu üstün özellikleri nedeniyle mineraloji, gemoloji ve endüstride en önemli minerallerden biridir. Bu üstün özelliklerin temelinde kristal yapısı yer almaktadır. Elmas ve grafit aynı kimyasal bileşime sahip olup yalnızca karbon (C) atomlarından oluşmalarına rağmen tamamen farklı fiziksel özellikler göstermektedir. Bunun temel nedeni, karbon atomlarının kristal yapı içerisindeki farklı dizilişidir.

Elmas, yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında kübik kristal sistemde kristallenmektedir. Kristal yapısında her karbon atomu dört komşu karbon atomuna güçlü kovalent bağlarla bağlanarak üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturmaktadır. Buna karşılık grafit hekzagonal kristal sistemde kristallenmekte olup karbon atomları tabakalı bir yapı meydana getirmektedir. Tabakalar içerisindeki bağlar oldukça güçlü olmasına rağmen tabakalar arasındaki bağlar zayıf olduğundan grafit kolaylıkla ayrılabilen ve yumuşak bir mineral özelliği

¹ Dr., Jeoloji Yüksek Mühendisi ORCID-ID 0000-0002-0407-8353

göstermektedir. Bu nedenle Mohs sertlik ölçeğinde grafitin sertliği yaklaşık 1–2 arasında değişirken, elmas 10 sertlik değeri ile doğal mineraller arasında bilinen en sert mineraldir. Elmas ve grafit arasındaki bu farklılık, minerallerin fiziksel özelliklerinin yalnızca kimyasal bileşim tarafından değil, aynı zamanda atomların kristal yapı içerisindeki dizilişi tarafından da belirlendiğini göstermektedir.

Bilinen en sert doğal mineral olan elmas, oktahedral {111} düzlemleri boyunca mükemmel dilinim özelliğine sahiptir. Bu nedenle belirli kristal düzlemleri boyunca kontrollü olarak ayrılabilir. Sertlik ile dilinim farklı özellikler olduğundan, elmas çizilmeye karşı son derece dirençli olmasına karşın uygun kristal düzlemlerine uygulanan darbeler sonucunda kırılabilir (Read, 2005).

Elmas Mohs sertlik ölçeğinde 10 değeri ile en sert doğal mineral olmasına rağmen sertliği tüm kristal doğrultularında aynı değildir. Karbon atomlarının kristal yapı içerisindeki yönelimine bağlı olarak bazı kristalografik doğrultular diğerlerine göre daha yüksek sertlik göstermektedir. Küp düzleminin diyagonal doğrultuları en yüksek sertliğe sahipken, dodekahedral düzleme paralel doğrultular nispeten daha düşük sertlik göstermektedir. Bu yönelimli sertlik özelliği, elmasın kesilmesi ve parlatılması sırasında büyük önem taşımakta; uygun kristal yönünün seçilmesi hem işleme verimini artırmakta hem de taşın zarar görmesini önlemektedir (Read, 2005).

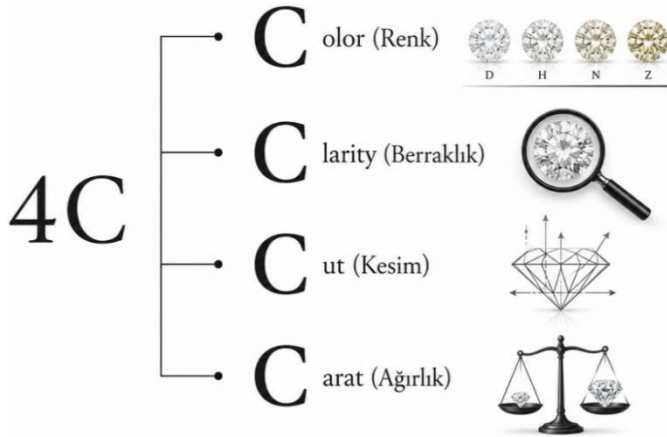
Elmaslar renksiz olabilecekleri gibi sarımsı, kahverengi, yeşil, mavi, pembe, kırmızı, mor ve altın sarısı gibi farklı doğal renklerde de bulunabilmektedir. Doğal renkli ("fancy") elmasların yanı sıra, ışınlama ve ardından uygulanan ısıtma işlemleriyle de farklı renkler elde edilebilmektedir. Nötron ışınlaması sonrasında oluşan yeşil renk, ısıtma işlemi uygulanmasıyla sarı, altın sarısı, kahverengi, pembe, kırmızı veya mor tonlarına dönüşebilmektedir. Elektron bombardımanı ise bazı elmaslarda açık mavi veya mavimsi yeşil renk oluşmasına neden olabilmektedir. Doğal mavi elmaslarda kristal örgüde karbon atomlarının bir kısmının bor atomları tarafından yer değiştirmesi, bu taşların ayırt edici özelliklerinden biri olarak belirtilmektedir (Read, 2005).

Gemolojik tanımlamada, renksiz saydam taşların optik görünümü dikkatle değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, belirgin adamantin parlaklık elmasa işaret eden önemli bir özellik olarak kabul edilirken, taşın gösterdiği ateş (fire) miktarı da elmas ile benzer görünümlü taşların ayırt edilmesinde dikkate alınan gözlemsel kriterlerden biridir (Read, 2005).

Elmasların önemli gemolojik özelliklerinden biri ultraviyole (UV) ışık altında floresans gösterebilmeleridir. Genel olarak elmasların yalnızca yaklaşık %15'i uzun dalga ultraviyole (LW UV) altında güçlü floresans sergiler. Ayrıca, uzun dalga UV altında mavi floresans gösteren ve ışık kaynağı kapatıldıktan sonra sarı

fosforesans (afterglow) oluşturan elmaslar, bu özelliğın diğer mavi floresans gösteren minerallerde görülmemesi nedeniyle tanımlamada ayırt edici bir özellik sunmaktadır. Bu nedenle UV incelemeleri, elmasların gemolojik değerlendirilmesinde kullanılan yardımcı testlerden biridir (Read, 2005).

Günümüzde gem kalitesindeki elmasların değerlendirilmesinde uluslararası kabul gören 4C sistemi kullanılmaktadır (Şekil 1). Bu sistem; renk (Color), berraklık (Clarity), kesim (Cut) ve karat (Carat) olmak üzere dört temel kalite kriterinden oluşmaktadır. Elmasın ticari değeri bu dört özelliğın birlikte değerlendirilmesiyle belirlenmektedir. Renk değerlendirmesi taşın renk derecesine, berraklık değerlendirmesi iç kapanımlar ve yüzey özelliklerine, kesim değerlendirmesi ise taşın ışık performansına dayanmaktadır. Karat (1 karat = 0,2 gram) ise elmasın ağırlığını ifade eden ölçü birimidir (GIA, 2019).



Şekil 1. Elmasların değerlendirilmesinde uluslararası kabul gören 4C sistemi.

Sahip olduğu üstün fiziksel ve optik özellikler nedeniyle elmas, gemoloji biliminin en önemli süstaşlarından biri olarak kabul edilmekte; yalnızca mücevher sektöründe değil, aynı zamanda ileri teknoloji uygulamaları ve bilimsel araştırmalarda da geniş kullanım alanına sahip bulunmaktadır. Elmasın tanımlanması, sınıflandırılması ve gemolojik değerlendirilmesinde kullanılan temel mineralojik ve gemolojik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Elmasın temel mineralojik ve gemolojik özellikleri (Schumann, 2013'den değiştirilerek alınmıştır)

Kimyasal Formülü	C	Özgül Ağırlık (SG)	3,50 – 3,53
Renk:	Renksiz, sarı, kahverengi, mavi, turuncu, siyah, kırmızımsı, nadiren yeşil	Saydamlık:	Saydam, yarı saydam, opak
Kristal Sistemi:	Kübik sistem	Parlaklık:	Adamantin (elmas parlaklığı)
Kristal Şekli:	Oktahedron (yaygın), hekzahedron, rombik dodekahedron	Işık Kırma İndisi:	2,417 – 2,419
Dilininim:	Mükemmel dilininim	Optik Karakter	İzotrop
Kırılma:	Konkoidal-düzensiz	Çift Kırma:	Yok
Sertlik:	10	Pleokroizma:	Yok
Çizgi Rengi	Beyaz	Dispersiyon:	0,044 (Yüksek)
Isıl İletkenlik	Çok Yüksek	Elektriksel İletkenlik	Genellikle yalıtkan (Tip IIb mavi elmaslar yarı iletken özellik gösterebilir.)
Floresans	Değişken; Renksiz-Sarı :genellikle mavi; Kahverengi-Yeşil: yeşil		
Absorpsiyon Spektrumu	Renksiz-Sarı: 478, 465, 451, 435, 423, 415, 401, 390 / Kahverengi-Yeşil: (537), 504 (498) nm		

3. Elmas Jeolojisi ve Oluşum Ortamları

Elmas, yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında kristallenen doğal bir karbon mineralidir. Doğal elmaslar, ekonomik açıdan işletilebilir miktarlarda Prekambriyen kratonlar üzerinde yer alan kimberlit ve daha az yaygın olarak lamproit bacalarında bulunan birincil yataklarda ve bu kayaçların ayrışmasıyla gelişen alüvyal (plaser) yataklarda bulunmaktadır. Elmaslarda bulunan mineral kapanımları ile elmas içeren kimberlit ve lamproitlerdeki ksenolitler, elmasların üst mantoda başlıca peridotit, eklojit ve daha seyrek olarak websterit gibi farklı kayaç topluluklarıyla ilişkili olduğunu göstermektedir. Basınç-sıcaklık hesaplamaları, elmasların büyük bölümünün yaklaşık 900–1300 °C sıcaklık ve 4,5–6 GPa basınç koşullarındaki elmas kararlılık alanında kristallendiğini ve bunun yaklaşık 140–200 km derinliklere karşılık geldiğini ortaya koymaktadır (Stachel & Harris, 2008).

Bu koşullar altında karbon atomları kübik kristal yapıda düzenlenerek elmasa dönüşürken, daha düşük basınç koşullarında grafit fazı kararlı hale gelmektedir. Bu nedenle elmas oluşumu, Dünya'nın yalnızca belirli derinliklerinde gerçekleşebilen özel jeodinamik koşullara bağlıdır (Şekil 2).

3.1. Derin Manto Kökenli Elmas Oluşumu

Parajenetik çalışmalar, doğal elmasların başlıca kaynak kayaçlarının peridotit ve eklojit olduğunu göstermektedir. Mineral kapanımlarına dayalı araştırmalar, inklüzyon içeren elmasların yaklaşık %65'inin peridotitik, %33'ünün eklojitik ve yaklaşık %2'sinin ise websteritik kökenli olduğunu ortaya koymaktadır (Stachel & Harris, 2009).

Elmasların yaşı, onları yeryüzüne taşıyan kimberlit ve lamproit kayaçlardan çok daha eskidir. Mineral kapanımlarının yaşlandırılmasına dayanan çalışmalar, elmasların bu magmaların yerleşiminden çok önce Dünya'nın mantosunda kristallendiğini ve kimberlit magması içerisinde oluşmadığını ortaya koymuştur (Stachel & Harris, 2009). Elmasın kararlı olduğu basınç-sıcaklık koşullarında karbon atomları grafit yerine elmas kristal yapısında kristallenmektedir.

Derin manto kökenli elmasların oluşumu Şekil 2a'da gösterilmektedir.

3.2. Dalma-Batma Zonları

Dalma-batma zonları, karbon ve uçucu elementlerin okyanusal litosfer ile birlikte derin mantoya taşınmasını sağlayan en önemli jeodinamik süreçlerden biridir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, özellikle bor içeren mavi elmasların (Tip IIb) oluşumunda bu sürecin önemli rol oynadığını ortaya koymuştur. Geleneksel olarak mantoda son derece düşük derişimlerde bulunduğu kabul edilen borun, derin manto elmaslarına nasıl taşındığı uzun yıllar açıklanamamıştır. Güncel araştırmalar ise deniz suyu ile altere olmuş okyanusal litosfer ve özellikle metaserpantinitle, borun derin mantoya taşınmasında temel rol oynadığını göstermektedir. Bor izotop verileri, mavi elmaslarda bulunan borun deniz suyu kökenli olduğunu ve geçiş zonu ile alt mantoya kadar uzanan su, karbon ve bor döngüsünün bir parçasını temsil ettiğini ortaya koymaktadır (Regier et al., 2023).

Ayrıca yüksek basınç ve yüksek sıcaklık deneyleri, karbonatlar ile metal borürler arasında gerçekleşen redoks reaksiyonlarının yaklaşık 22,5 GPa ve 2100 K koşullarında bor içeren elmasların kristallenmesini sağlayabildiğini deneysel olarak ortaya koymuştur (Liu et al., 2023). Bu bulgular, dalma-batma zonlarının doğrudan elmasın oluştuğu ortamdan ziyade, elmas oluşumu için gerekli karbon ve bor gibi elementlerin derin mantoya taşınmasını sağlayan önemli bir jeodinamik mekanizma olduğunu göstermektedir (Şekil 2b).

3.3. Kimberlit ve Lamproit Magmaları ile Yüzeye Taşınma

Mantoda yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında oluşan elmas kristalleri, bulundukları derinliklerden yeryüzüne kendiliğinden ulaşamaz. Günümüzde yaygın olarak kabul edilen görüşe göre elmaslar, mantoda oluşmuş ksenokristaller olup kimberlit ve daha az yaygın olarak lamproit magmaları tarafından yeryüzüne taşınmaktadır. Bu nedenle ekonomik elmas yataklarının oluşabilmesi, derin kökenli ve hızlı yükselen bu magmatik kayaçların varlığına bağlıdır (Kjarsgaard et al., 2022; Mitchell, 1986, 1995).

Kimberlitler, manto kökenli magmalardan oluşan, silikaca doygun olmayan, olivin bakımından zengin ve CO₂ ile H₂O bakımından zengin ultramafik magmatik kayaçlardır. Hibrit özellik gösteren bu kayaçlar; primer magmatik minerallerin yanı sıra ksenokristaller, hidrotermal mineraller ve nadir elmas kristalleri içerir. Ayrıca yükselişleri sırasında mantodan ve yer kabuğundan kopardıkları ksenolitleri de bünyelerinde taşıyabilirler. Güncel sınıflandırmada, geçmişte Grup II kimberlit olarak adlandırılan kayaçlar petrojenez açısından kimberlitlerden farklı kabul edilmekte ve olivin lamproit (orangeite) olarak sınıflandırılmaktadır (Mitchell et al., 2019).

Kimberlitler, dünya elmas üretiminin büyük bölümünü sağlayan birincil elmas yataklarının başlıca kaynağını oluşturur (Mitchell, 1986, 1995). Bununla birlikte, kimberlitlere göre daha az yaygın olan olivin lamproitler de birincil elmas içeren magmatik kayaçlardır. Adlarını Güney Afrika'daki Kimberley bölgesinden alan bu kayaçlar, çoğunlukla baca (pipe) oluşturan, havuç biçimli volkanik yapılar şeklinde gelişir. Lamproitler ise daha sınırlı yayılış göstermelerine karşın, Avustralya'daki Argyle gibi önemli elmas yataklarının ev sahibi kayaçlarını oluştururlar (Kjarsgaard et al., 2022; Mitchell, 1995).

Bununla birlikte her kimberlit veya lamproit intrüzyonu ekonomik miktarda elmas içermez. Bir magmanın ekonomik elmas yatağı oluşturabilmesi; elmasın kararlı olduğu manto seviyelerinden kaynaklanması, yükselişi sırasında elmas kristallerini koruyabilmesi ve yeterli miktarda elması yüzeye taşıyabilmesine bağlıdır.

Elmasların üst mantoda oluşumu ve daha sonra kimberlit ile lamproit magmaları tarafından yeryüzüne taşınma süreci Şekil 2c'de gösterilmektedir.

3.4. Çarpma (İmpakt) Kökenli Elmas Oluşumu

Meteorit çarpmaları sonucunda oluşan çarpma yapıları; eriyik kayaçlar, çarpma breşleri ve şok metamorfizması ürünleri ile karakterizedir. Bu yapıların tanınmasında şok etkisiyle oluşan mineraller temel kanıtlar arasında yer almaktadır (Koeberl et al., 2024).

Çarpma (impakt) kökenli elmaslar, büyük göktaşı çarpmaları sırasında oluşan aşırı basınç ve sıcaklık koşullarında karbonlu materyallerin elmasa dönüşmesiyle meydana gelir. Bu oluşuma ilişkin güncel örneklerden biri, İskoçya'daki yaklaşık 1,2 milyar yaşlı Stac Fada Üyesi'nde tanımlanan mikrometre boyutundaki çarpma elmaslarıdır. Aynı çalışmada elmaslarla birlikte yüksek basınç minerali koezit (nadir bir kuvars polimorfu) de belirlenmiş olup, bu bulgular çarpma olaylarının mikroskobik boyutta yeni elmas oluşumuna yol açabileceğini göstermektedir (Goodwin et al., 2023)

Çarpma (impakt) kökenli elmaslar ile meteoritlerde bulunan nanoelmaslar birbirinden farklıdır. İmpakt elmasları Dünya yüzeyinde gerçekleşen çarpma olayları sırasında oluşurken (Şekil 2d.1), meteoritik nanoelmaslar meteoritlerin bünyesinde önceden bulunan ve çoğunlukla Güneş Sistemi'nin erken evrelerinde veya meteorit ana gövdelerinde meydana gelen yüksek basınç süreçleriyle oluşmuş nanometre boyutlu kristallerdir (Şekil 2d.2). Her iki elmas türü de genellikle mikrometre veya nanometre boyutlarında bulunduğundan ekonomik açıdan işletilebilir bir kaynak oluşturmaz.

Çarpma kökenli elmas oluşum mekanizması Şekil 2d'de şematik olarak gösterilmiştir.

3.5. Plaser (İkincil) Elmas Yatakları

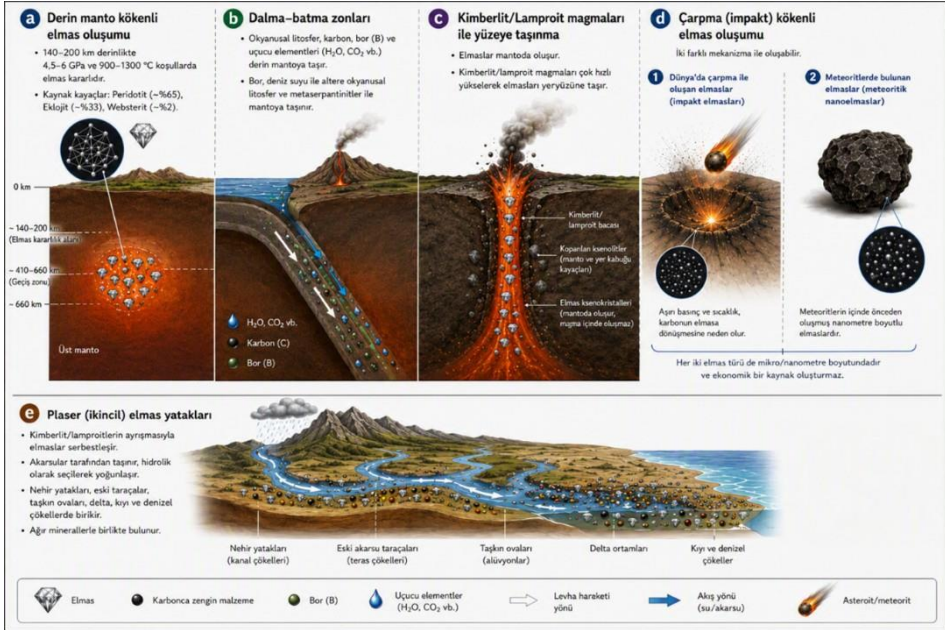
Birincil elmas yataklarını oluşturan kimberlit ve lamproit bacaları uzun jeolojik zaman boyunca fiziksel ve kimyasal ayrışmaya uğrayarak parçalanmaktadır. Bu süreçte kayaç bünyesinde bulunan elmas kristalleri ana kayadan serbestleşmekte ve akarsular tarafından taşınmaktadır. Yaklaşık 3,52 g/cm³ özgül ağırlığa sahip olan elmaslar, yüksek yoğunlukları ve kimyasal dayanıklılıkları nedeniyle hidrolik olarak seçilerek nehir yatakları, alüvyal çökeller, taşkın ovaları, eski akarsu taraçaları, delta ortamları ile kıyı ve denizel çökeller içerisinde yoğunlaşır ve birikir.

Güney Afrika'da kimberlit bacalarının keşfedilmesiyle birlikte doğal elmasların birincil kaynakları belirlenmiş, bu kayaçların aşınmasıyla oluşan plaser yataklarının ise ikincil elmas birikimleri olduğu anlaşılmıştır (De Wit, 2024).

Plaser yataklarında bulunan elmasların morfolojik ve iç yapısal özellikleri, birincil kaynak kayaçların aşınma geçmişi ve elmasların taşınma süreçleri hakkında önemli bilgiler sunar. Sibiry Platformu'nun kuzeydoğu alüvyonlarından elde edilen yuvarlak elmaslar üzerinde yapılan ayrıntılı çalışmalar, plaser ortamlarında yaygın görülen koyu gri-siyah renkli, yuvarlak dodekahedral kristallerin belirgin bir radyal mozaik iç yapı sergilediğini ortaya koymuştur (Ragozin et al., 2016).

Dolayısıyla plaser elmaslarının iç yapısı, yüzey aşınma izleri ve inklüzyon tipleri birlikte değerlendirildiğinde, bu kristallerin uzak mesafeli taşınma, yüksek aşırı doygunlukta hızlı büyüme ve mantoda uzun süreli bekleme gibi çok aşamalı bir evrim geçirdiği anlaşılmaktadır. Bu tür veriler, plaser yataklarının olası birincil kimberlit ve lamproit kaynaklarının araştırılmasında önemli bir jeolojik gösterge niteliği taşır.

Plaser elmas oluşum mekanizması temsili olarak Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2 Elmasın başlıca oluşum ortamları: (a) Derin manto kökenli elmas oluşumu; (b) Dalma-batma zonlarında oluşan elmaslar; (c) Kimberlit ve Lamproit Magmaları ile Yüzeye Taşınma; (d) Çarpma (impakt) kökenli elmaslar; (e) Plaser (ikincil) elmas yatakları

4. Elmasa Benzeyen ve Elmas Yerine Kullanılan Taşlar

Elmasın yüksek parlaklığı, sertliği ve optik özellikleri nedeniyle tarih boyunca doğal ve sentetik birçok taş elması taklit etmek için kullanılmıştır. Bu taşlar arasında doğal zirkon, kübik zirkonya (CZ), mozanit (moissanite), itriyum alüminyum granat (YAG), gadolinyum galyum granat (GGG) ve cam en yaygın örneklerdir. Doğal zirkon, yüksek kırılma indisi ve güçlü dispersiyonu nedeniyle uzun yıllar elmas benzeri bir görünüm sağlaması amacıyla kullanılmıştır. Kübik zirkonya ise sentetik olarak üretilen, düşük maliyetli olması nedeniyle günümüzde en yaygın elmas taklitlerinden biridir. YAG ve GGG gibi sentetik

granatlar, kübik zirkonyanın yaygınlaşmasından önce elmas benzeri görünüm elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Cam ise düşük sertliği ve optik özellikleri nedeniyle yalnızca düşük maliyetli imitasyon ürünlerinde kullanılmaktadır. Bu taklitler elmasın ısı iletkenlik özelliğini taşımadığı için kolaylıkla ayırt edilebilmekteydi. Ancak 1997 yılında ilk sentetik mozanit piyasaya çıkmıştır (Schumann, 2013). Mozanit, sertliği, yüksek kırılma indisi, dispersiyonu ve ısı iletkenliği sayesinde elmasa oldukça benzer özellikler göstermekte olup özellikle mücevher sektöründe önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, elması taklit etmek için kullanılan birçok taşın günümüzde kullanım alanı büyük ölçüde azalmıştır.

Günümüzde gemolojik incelemelerde sertlik, kırılma indisi, dispersiyon, özgül ağırlık, çift kırılma, ısı iletkenlik ve mikroskopik iç yapı gibi özellikler değerlendirilerek bu taşlar doğal elmaslardan güvenilir şekilde ayırt edilebilmektedir. Elmas ile elmas takliti olarak kullanılanlar bazı taşların temel gemolojik özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Elmas ile elmas takliti olarak kullanılan başlıca taşların gemolojik özelliklerinin karşılaştırılması (Liddicoat, 1993; Schumann, 2013 değiştirilerek alınmıştır)

Özellik	Elmas	Mozanit	Kübik Zirkonya	Doğal Zirkon	YAG	GGG	Cam
Kimyasal bileşim	C	SiC	ZrO ₂	ZrSiO ₄	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Gd ₃ Ga ₃ O ₁₂	SiO ₂
Mohs sertliği	10	9.5	8–8.5	6.5–7.5	8.5	6.5	5–6.5
Kırılma indisi (RI)	2.417–2.419	2.648–2.691	2.150–2.180	1.810–2.024	1.833–1.835	1.970–2.020	1.44–1.90
Dispersiyon	0.044	0.104	0.06	0.038	0.028	0.045	0.01
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.50–3.53	3.10–3.22	5.50–6.00	3.93–4.73	4.55–4.65	7.00–7.09	2.04–2.005
Çift kırılma	Yok	Var	Yok	Var	Yok	Yok	Yok
Isı iletkenlik	Çok yüksek	Yüksek	Çok düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Çok Düşük

Tablo 2 incelendiğinde, mozanitin sertlik, kırılma indisi ve özellikle yüksek dispersiyon değeri bakımından elmasa en fazla benzeyen taş olduğu görülmektedir. Bu nedenle günümüzde elmasla en fazla karıştırılan taşların başında mozanit gelmektedir. Mozanit, kimyasal bileşimi silisyum karbür (SiC) olan ve doğal oluşumları son derece nadir görülen bir mineraldir. Mücevherlerde kullanılan mozanitlerin hemen hemen tamamı laboratuvar ortamında üretilmektedir. Elmasa benzeyen görünümü, yüksek sertliği ve belirgin optik özellikleri nedeniyle yaygın bir elmas benzeri taş olarak kullanılmaktadır (Tablo 2). Mozanitin dispersiyon değeri elmastan daha yüksetir. Bu nedenle mozanit, beyaz ışığı spektral renklere elmastan daha güçlü biçimde ayırarak daha belirgin bir “ateş (fire)” görünümü oluşturabilir.

Mozanit, 1893 yılında Fransız kimyager ve daha sonra Nobel Kimya Ödülü'nü kazanan Dr. Henri Moissan tarafından Arizona'daki bir meteorit kraterinden elde edilen örneklerin incelenmesi sırasında keşfedilen son derece nadir bir silisyum karbür (SiC) mineralidir. Keşfedilen bu yeni mineral, araştırmacının onuruna mozanit (moissanite) olarak adlandırılmıştır. Dr. Moissan, yaşamı boyunca bu minerali laboratuvar ortamında yeniden üretmeye çalışmış ancak başarılı olamamıştır. Mozanitin mücevher olarak kullanılabilmesi, doğal örneklerinin çok nadir bulunması nedeniyle ancak laboratuvar üretim tekniklerinin gelişmesiyle mümkün olmuştur. 1990'lı yılların sonlarında Kuzey Carolina'daki Research Triangle Park araştırmacıları, yüksek saflıkta silisyum karbür kristallerinin sentezlenmesine olanak sağlayan bir üretim yöntemini geliştirerek başarılı olmuştur. (*The History of Moissanite Gemstone* | *American Gem Society*, n.d.)

Elmas ve mozanit, yüksek ısı iletkenlik göstermeleri bakımından diğer birçok elmas benzeri malzemeden ayrılır. Elmas, 100 K'nin üzerindeki sıcaklıklarda bilinen malzemeler arasında en yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Yaklaşık 300 K sıcaklıkta, en saf doğal tek kristal elmasların ısı iletkenliği $24\text{--}25 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ olarak rapor edilmiştir. Aynı koşullarda bakırın ısı iletkenliği $4 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, gümüşün ise $4,15 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ düzeyindedir (Graebner, 1995). Bu değerlere bakılırsa elmas, bakır ve gümüşün yaklaşık 5–6 katı ısı iletkenliğe sahiptir. Mozanitte ise Mozanit (SiC), 293 K sıcaklıkta yaklaşık $500 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ düzeyindeki yüksek termal iletkenliği ve havada yaklaşık 1400 K'ye kadar koruyabildiği yüksek termal kararlılığı ile dikkat çeken bir malzemedir (Qian et al., 2005). Elmasın yüksek ısı iletkenliği, güçlü kovalent bağlarla oluşmuş düzenli kristal yapısında kafes titreşimlerinin etkin biçimde iletilmesiyle ilişkilidir. Bununla birlikte, elmas ile mozanitin ısı iletkenlik aralıkları kısmen birbirine yaklaştığından, yalnızca ısı iletkenliği ölçen bazı klasik elmas test cihazları sentetik mozaniti elmas olarak değerlendirebilir. Bu nedenle mozanitin elmadan ayırımında yalnızca ısı iletkenlik ölçümüne dayanılmamalıdır. Mozanitin çift kırılmalı, elmasın ise normal koşullarda tek kırılmalı olması en belirgin ayırt edici yöntemlerden birisidir. Ayrıca elektriksel iletkenlik ölçümleri, kırılma özellikleri, mikroskobik inceleme ve gerektiğinde Raman ya da kızılötesi spektroskopisi birlikte kullanılabilir. Bununla birlikte, elmasların büyük çoğunluğu elektriksel olarak yalıtkan özellik gösterirken, bor içeren mavi elmaslar (Tip IIb) yarı iletken davranış sergileyebilmektedir. Bu nedenle tek başına elektriksel iletkenlik ölçümü, elmas ile mozanitin ayırt edilmesinde kesin tanı yöntemi olarak kullanılmamalıdır.

5. Osmanlı Cevahirnamelerinde Elmas

Osmanlı Dönemi'nde elmas, yalnızca ekonomik değeri yüksek bir süstaşı değil; aynı zamanda zenginlik, iktidar, güç ve ihtişamın sembolü olarak kabul edilmiştir. Elmas ve diğer değerli taşlar, mücevher yapımının yanı sıra tahtlar, taht askıları, sorguçlar, hançerler, tesbihler, mataralar, mücevher kutuları ve çeşitli saray eşyalarının süslenmesinde yaygın olarak kullanılmıştır. Bunun yanında, dönemin tıp anlayışı doğrultusunda bazı değerli taşların tedavi edici özelliklere sahip olduğuna inanılmış ve ilaç yapımında da değerlendirildiği görülmektedir.

Doğal değerli taşların yanı sıra işlenmiş ve taklit (imitasyon) taşların kullanımının yaygınlaşması, taşların ayırt edilmesine yönelik bilgi birikiminin gelişmesini teşvik etmiştir. Bu durum, günümüzde gemoloji disiplininde kullanılan taş tanımlama ve sınıflandırma yaklaşımlarının tarihsel örnekleri olarak değerlendirilebilir.

Osmanlı bilim dünyasında değerli taşlar, İlm-i Ma'âdin (Madenler İlmî) içerisinde yer alan İlm-i Cevâhir (Cevherler veya Değerli Taşlar İlmî) kapsamında incelenmiştir. Bu alanda kaleme alınan Tuhfe-i Murâdî ile Cevher-nâme-i Sultân Murâdî gibi eserler, dönemin değerli taşlara ilişkin bilgi birikimini, kullanım alanlarını ve taşlara atfedilen fiziksel, tıbbi ve sembolik özellikleri ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Ayrıca Topkapı Sarayı başta olmak üzere günümüze ulaşan Osmanlı saray mücevherleri de elmasa verilen önemin somut göstergeleridir.

Osmanlı cevahirnamelerinde elmas, "الماس" (elmas) adıyla anılmaktadır. Bu eserlerde elmasın yalnızca bir süstaşı olarak değil, aynı zamanda bazı tıbbi uygulamalarda kullanılan bir materyal olarak da tanımlandığı görülmektedir. Tuhfe-i Murâdî'de Aristoteles'e (Arestatalis) atfedilen bir kayıta, böbrek taşlarının parçalanması amacıyla ucuna elmas yerleştirilmiş ince bir metal aletin idrar yolundan ilerletilerek böbrek taşın kırılmasının hedeflendiği belirtilmektedir (Argunşah, 1999). Bu anlatım, modern ürolojide kullanılan Üreteroskopi (URS) yöntemine tarihsel açıdan benzerlik göstermesine rağmen, uygulamanın etkinliğine ilişkin bilimsel bir kanıt bulunmamaktadır.

Osmanlı cevahirnamelerinde yalnızca elmasın kullanım alanlarına değil, gerçek elmasın taklitlerinden ayırt edilmesine yönelik çeşitli gözlem yöntemlerine de yer verilmiştir. Bu bilgiler, dönemin gemolojik bilgi birikimini yansıtmaları bakımından dikkat çekicidir. Tuhfe-i Murâdî ve Cevher-nâme-i Sultân Murâdî'de, elmasın doğruluğunu sınamak amacıyla farklı uygulamalar önerilmektedir. Bunlardan birinde, elmasın ateşte ısıtıldıktan sonra üzerine kar suyu veya soğuk su serpilmesi tavsiye edilmekte; taşın bu işlem sonrasında temizlenerek parlaklığını kazanması gerçek elmasın göstergesi, aynı sonucu

vermemesi ise taşın değersiz olduğunun işareti olarak kabul edilmektedir (Mustafa b. Seydî, 2019; Şîrvânî, 1999). Bir diğer yöntemde ise elmasın çevresi balmumu ile kapatıldıktan sonra güneş ışığına tutulması önerilmiş; taşın içinde veya çevresinde gökkuşağını andıran renklerin görülmesi kaliteli ve gerçek elmasın göstergesi olarak değerlendirilirken, bu özelliğin görülmemesi taşın düşük kaliteli veya taklit olabileceği şeklinde yorumlanmıştır (Mustafa b. Seydî, 2019; Şîrvânî, 1999). Günümüz gemoloji bilimi açısından bu bilgiler bilimsel olarak doğrulanmış uygulamalar olarak kabul edilmemekle birlikte, değerli taşlara ilişkin tarihsel bilgi birikimi ve kültürel algının gelişimini göstermesi bakımından önemli kaynaklar niteliğindedir.

Tuhfe-i Murâdî'de elmasın yeni doğan çocukların boynuna veya koluna bağlanması hâlinde onları korku ve sara benzeri rahatsızlıklardan koruyacağı yönünde ifadeler de yer almaktadır (Şîrvânî, 1999). Bu tür bilgiler, günümüz bilimsel verileriyle doğrulanmış uygulamalar olarak değil, dönemin tıbbi ve kültürel inançlarını yansıtan tarihî kayıtlar olarak değerlendirilmelidir.

Bu örnekler, Osmanlı cevahirnamelerinde elmasın yalnızca fiziksel özellikleriyle tanımlanan bir süstaşı olmadığını; aynı zamanda tıbbi, koruyucu ve sembolik anlamlar yüklenen çok yönlü bir değerli taş olarak ele alındığını göstermektedir. Günümüz gemoloji bilimi bu tür tarihî bilgileri bilimsel gerçeklikten ziyade, değerli taşlara ilişkin tarihsel bilgi birikimi ve kültürel algının gelişimini ortaya koyan önemli belgeler olarak değerlendirmektedir.

KAYNAKLAR

- De Wit, M. (2024, July 8). Diamonds delivered to the West Coast of southern African from erosion of Kaapvaal based kimberlites and lamproites. *International Kimberlite Conference Extended Abstracts: 2024*. <https://doi.org/10.29173/ikc4044>
- GIA. (2019). *Diamond Essentials*. Gemological Institute of America.
- Goodwin, A., Tartèse, R., Garwood, R. J., Jerrett, R., & Joy, K. H. (2023). Provenance of altered carbon phases and impact history of the Stac Fada Member, NW Scotland. *Meteoritics and Planetary Science*, 58(8), 1099–1116. <https://doi.org/10.1111/maps.14035>
- Graebner, J. E. (1995). Thermal Conductivity of Diamond. In *Diamond: Electronic Properties and Applications* (pp. 285–318). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2257-7_7
- Kjarsgaard, B. A., de Wit, M., Heaman, L. M., Pearson, D. G., Stiefenhofer, J., Januscacak, N., & Shirey, S. B. (2022). A Review of the Geology of Global Diamond Mines and Deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 88(1), 1–117. <https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.01>
- Koeberl, C., Schulz, T., & Huber, M. S. (2024). Precambrian impact structures and ejecta on earth: A review. *Precambrian Research*, 411. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107511>
- Liddicoat, R. T. . (1993). *Handbook of gem identification*. Gemological Institute of America.
- Liu, S., Lu, W., Zhang, X., Song, J., Lü, J., Liu, X., Wang, Y., Chen, C., & Ma, Y. (2023). A viable mechanism to form boron-bearing diamonds in deep Earth. *Science Bulletin*, 68(13), 1456–1461. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.06.011>
- Mitchell, R. H. (1986). *Kimberlites*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0568-0>
- Mitchell, R. H. (1995). *Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1993-5>
- Mitchell, R. H., Giuliani, A., & O'Brien, H. (2019). What is a Kimberlite? Petrology and Mineralogy of Hypabyssal Kimberlites. *Elements*, 15(6), 381–386. <https://doi.org/10.2138/gselements.15.6.381>
- Mustafa b. Seydî. (2019). *Cevher-nâme-i Sultân Murâdî* (S. Murad, Ed.). DBY Yayınları.
- Qian, J., Daemen, L. L., & Zhao, Y. (2005). Hardness and fracture toughness of moissanite. *Diamond and Related Materials*, 14(10), 1669–1672. <https://doi.org/10.1016/J.DIAMOND.2005.06.007>

- Read, P. G. . (2005). *Gemmology* (Third edition). Elsevier Butterworth Heinemann.
<https://books.google.com/books/about/Gemmology.html?hl=tr&id=t-OQO3Wk-JsC>
- 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., & Pearson, D. G. (2023). Boron isotopes in blue diamond record seawater-derived fluids in the lower mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 602. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117923>
- Schumann, W. (2013). *Gemstones of the world* (Fifth Edition). Sterling.
- Şirvânî, M. bin M. (1999). *Tuhfe-i Murâdî (Cevhernâme)* (M. Argunşah, Ed.). Türk Dil Kurumu.
- Stachel, T., & Harris, J. W. (2008). The origin of cratonic diamonds — Constraints from mineral inclusions. *Ore Geology Reviews*, 34(1–2), 5–32. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2007.05.002>
- Stachel, T., & Harris, J. W. (2009). Formation of diamond in the Earth's mantle. *Journal of Physics Condensed Matter*, 21(36). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/36/364206>
- The History of Moissanite Gemstone* | *American Gem Society*. (n.d.). Retrieved July 23, 2026, from <https://www.americangemsociety.org/moissanite-history/>

5. Bölüm

Stratejik Ham Maddelerin Veri Analitiği Yaklaşımlarıyla İncelenmesi

Şahika ERCAN¹, Elifcan GÖÇMEN POLAT²

1. Giriş

Hammaddeler, ülke ekonomisinin ve sanayilerinin işleyişinde temel yapı taşlarını oluşturmaktadır. Ülkelerin ekonomik politikalarını sürdürülebilirlik doğrultusunda şekillendirmeleri, bu dönüşümde kullanılan teknolojilerde ihtiyaç duyulan hammaddelerin kritik önemini de ortaya koymaktadır (Polat, 2023). Kritik hammaddeler, ülke ekonomisi için önemli olan ve kıtlık ve jeopolitik nedenlerden dolayı yüksek tedarik riskiyle karşı karşıya olan hammaddelerdir. Stratejik hammaddeler, ülkelerin kilit endüstrileriyle ilgili stratejik hedeflerine ulaşmak için kritik rol oynayan hammaddelerdir. Bu endüstriler arasında yenilenebilir enerji, dijital, uzay ve savunma sektörleri yer almaktadır. Bu hammaddeler, sanayi süreçlerinin temelini oluşturarak sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Dijital teknolojilerin ilerlemesi ve yeşil dönüşüm girişimlerinin hız kazanmasıyla, kritik hammaddelere olan talep önemli ölçüde artmıştır (Göçmen-Polat, 2024). Bu sektörlerde kullanılan hammaddelerin arz ve talep dengesizlikleri ile karşı karşıya kalması beklenmektedir. Ayrıca, bu hammaddelerin üretiminde zorluklar yaşanmaktadır. Temelde, “stratejik” kategorisinin eklenmesi, bu hammaddelerin sektör bazlı önemini vurgulamaktadır. Stratejik hammaddeler, bazı kritik hammaddelerle çakışabilir çünkü bu hammaddeler çeşitli endüstrilerdeki hayati rollerinden dolayı stratejik açıdan da önemli kabul edilmektedir. Stratejik ve kritik hammaddeler arasındaki ayrım, ülkelerin her tür hammadde için daha hassas politika önlemleri, kaynak yönetimi stratejileri ve belirli hammaddelerin ekonomik önemine ve sınırlı bulunabilirliği ya da tedarik kesintileriyle ilgili risklere yönelik daha hedefli eylemler geliştirmesine olanak tanımaktadır. Avrupa Kritik Hammaddeler Yasası-EU Act (2023) geri kazanım ve geri dönüşüm oranlarını artırarak kritik hammaddelerin sürdürülebilir kullanımını sağlamak için önlemler alınmasını hedeflemektedir, bu çabada karşılaşılan önemli bir zorluk, bu hammaddelerin geleceğe dönük talep ve arzlarının

¹ Arş.Gör., Karabük Üniversitesi, ORCID: 0009-0005-4596-7914

² Doç. Dr., Munzur Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-0316-281X

izlenebilir olmamasıdır. Bir hammaddenin yaşam döngüsü boyunca üretim değerlerinin ve dış ticaret verilerinin ne olacağının bilinmemesi, kaynak sağlama ve üretim süreçleriyle ilgili etkileri değerlendirmeyi zorlaştırır ve dolayısıyla sorumlu adımlar atmayı engellemektedir. Bu nedenle bu değerlerin tahmini Kritik Hammaddeler Yasası'nın hedeflerini desteklemede kritik bir rol oynayabilir. Özellikle, doğru tahminlerle tedarik risklerinin izlenmesi, kritik hammaddelerin geri kazanılması ve geri dönüştürülmesi gibi iki önemli tedbiri desteklemek için oldukça önemlidir. Ayrıca, üretiminde veya ithalat verilerinde artış olacağı düşünülen hammaddelerin kritik veya stratejik listeye alınması, bu hammaddeler için özel politikalar geliştirilmesi açısından da önemli olacaktır.

Hammadde ithalatı ve ihracatı konularında zaman serisi analizleri kullanan çeşitli akademik çalışmalar bulunmaktadır. Say vd. (2024), temiz enerji kaynağının gelecekteki eğilimlerini belirleyerek, bu kaynaklarla ilişkili teknolojilerde kullanılan hammaddelere yönelik talep seviyeleri ve kritik hammaddelerin stratejik önemi zaman serileriyle ortaya konulmaktadır. Duran (2016), Türkiye'de hammadde ve yatırım malları ithalatının ekonomik büyümeye etkisini ve aralarındaki nedensellik ilişkilerini incelemektedir. Çalışmada zaman serisi analiz yöntemleri kullanılmıştır. Polat vd. (2023), Türkiye'nin ithalat verileri kullanılarak gelecekteki yıllar açısından hammadde kritikliğini belirlemek için Zaman Serisi Analizi modellerinden biri olan Üstel Düzeltme Tahmini kullanmışlardır. Bu tahmin değerlerindeki eğilime göre hammaddenin kritikliği değerlendirilmektedir. Uçan ve Saraç (2020), Türkiye'de ithalat, döviz kuru ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkileri zaman serisi analizleriyle değerlendirmiştir.

Bu çalışmalar, hammadde ithalatı ve ihracatı ile ekonomik göstergeler arasındaki ilişkileri zaman serisi analizleriyle ortaya koymaktadır. Güner ve Demir (2022), demir çelik ithalatının tarihsel süreçteki gelişimini analiz edilerek, yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak en uygun tahmin modelinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, ithalatın yapısal analizi gerçekleştirilmiş, makroekonomik değişkenlerle olan ilişkisi incelenmiştir. Bayar ve Tokpunar (2014), Türkiye'nin ihracatını sektörel bazda ele alarak analiz etmişlerdir. 1998-2012 yılları arasındaki çeyreklik veriler kullanılarak, zaman serisi denklemleri oluşturulmuş ve değişkenler arasındaki uzun ve kısa vadeli ilişkiler analiz edilmiştir. Uçum (2016), Türkiye'deki soya üretiminin mevcut durumunu analiz etmek ve geleceğe yönelik üretim tahminleri yapmak amacıyla soya üretimi ve ticaretinin önümüzdeki beş yıllık dönemdeki projeksiyonunu belirlemiştir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)'ten üretim verileri ve Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO)'ndan ithalat verileri alınarak zaman serisi analizleri yapılmıştır. Merdan (2023), Türkiye'de şeker piyasasının mevcut durumunu değerlendirmek ve geleceğe yönelik öngörülerde bulunmak için, zaman serisi analizlerinden Üstel Düzeltme Yöntemi kullanmıştır. Analizlerde

kullanılan ikincil veriler, TÜİK ve Türkiye Şeker Fabrikaları Anonim Şirketi (TŞFAŞ) veri tabanları ile internet sitelerinden temin edilmiştir. Maden yurtiçi hasıla değerleri, zaman serileri yöntemi ile analiz edilerek, ileriye dönük tahminler yapılmıştır. Veriler, SPSS programı ile analiz edilmiş ve ARIMA ile tahmin değerleri verilmiştir (Kınaş ve Özdoğan, 2022). AB çimento sektörünün 2030 yılı karbon emisyon tahminleri ARIMA ve Yapay Sinir Ağları yöntemleriyle analiz edilmektedir. Sonuçlar, emisyonlarda düşüş olmayacağını ve sektörün ciddi risklerini ortaya koymaktadır (Kılınç ve Şanlısoy, 2025). Türkiye'nin fındık sektöründe ARIMA modeliyle fiyat, miktar ve değer tahminleri yapılmaktadır. Durağanlığı sağlanan serilerin analizine göre, ihracat fiyatı ve değerinin artacağı ve ihracat miktarının dalgalı seyredeceği elde edilmektedir (Kaplan ve Çiçek, 2025).

Çalışmanın literatüre katkısı, dört ayrı sektör sınıfı için hammaddelerin yıllara göre üretim değerleri ve dış ticaret trendlerinin zaman serileri yöntemleriyle analiz edilmesidir. Sektör sınıfları dışında, her sektör içerisinde mevcut hammaddelerin de zaman serisi yöntemleriyle analizi gerçekleştirilmektedir. Çalışma, üretim değerlerinin tahminlerine göre hammaddelerin ikamesi veya geri dönüşüm yaklaşımları gibi alternatif politikalar geliştirmek için önemli olacaktır. Ayrıca, sonuçlar dış ticaret değerleri ve üretimleri artan bazı hammaddelerin, kritik veya stratejik hammadde sınıfında yer almasını sağlayacaktır.

2. Materyal-Yöntem

Veri Analizi

Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğünden temin edilen üretim veri seti 2016-2023 yılları ve 2010-2018 dış ticaret verileri içermektedir. Veriler, endüstriyel hammaddeler, çimento-inşaat, metalik madenler ve enerji hammaddeleri olmak üzere dört ana grupta sınıflandırılmıştır. Bu veri seti, Türkiye'nin madencilik sektöründeki üretim, ihracat ve ithalat eğilimlerini analiz etmek, sektördeki değişimleri değerlendirmek ve geleceğe yönelik tahminlerde bulunmak için önemli bir kaynak sunmaktadır.

Zaman Serileri Analizi

Sistemlerin etkin kontrolü için tahmin yaklaşımı çok önemli faydalar sağlamaktadır (Palit ve Popovic, 2005). Sistemlerin gelecekteki davranışlarını zaman serilerini kullanarak tahmin etmek önemli bir araştırma alanıdır (Gao vd. 2003). Üretim değerleri ve dış ticaret verileri, önemli ekonomik endeksler olup, her ülke için hammadde geliştirme politikasının oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır. Hammadde taleplerinin gelecek tahminleriyle işleme ve hammadde değerlendirme stratejilerinin ekonomik entegrasyonu sağlanabilir. Element bazında

Üretim değerlerini tahmin etmek için trend analizi önerilmiştir. MTA verileriyle geçmiş üretim rakamlarından hareketle gelecekteki hammadde arzını tahminini amaçlayan, En Küçük Kareler Yöntemi tabanlı bir zaman serisi analizi yöntemi olan trend analizinde, enerji, imento, endüstri ve metalik sektörlerine ait yıllık üretim verileri bağımlı değişken, zaman ise bağımsız değişken olarak tanımlanarak, veriler arasındaki toplam hata karelerini minimize eden en uygun doğrusal hat matematiksel olarak türetilmiştir. Analiz kapsamında, her sektörün yıllık ortalama büyüme ivmesini temsil eden eğim katsayısı hesaplanmış, modelin güvenilirliği Minitab üzerinden test edilmiş ve elde edilen denklemin gelecek yıllara tahmini yapılarak sektörlerin hammadde üretim kapasitelerine dair projeksiyonlar oluşturulmuştur. Trend analizi, zaman serisi verilerindeki değişimleri inceleyerek verinin genel yönelimini tespit etmeye yarayan bir yöntemdir. Geçmiş verilerin sunduğu eğilimlerden yola çıkararak geleceğe dair öngörüler geliştirmeyi sağlayan bu yaklaşım; sistemin gelecekteki olası seyrini anlamlandırmak için kullanılmaktadır (Deniz, 2025).

Trend analizi, çalışmada verinin karakterini tanımlayan bir ön analiz olarak kullanılmaktadır.

Doğrusal trend analizi aşağıdaki formülle gösterilmektedir:

$$Y = a + bt + e$$

Y=Zaman serisi değeri

a= Sabit terim

b= Eğim

t=Zaman

e= Hata

ARIMA, zaman serisi verilerinin analiz edilmesi ve tahmin edilmesi için kullanılan bir istatistiksel modeldir. Durağan olmayan zaman serilerini analiz edebilmesi ve geçmiş değerler ile hata terimlerini kullanarak tahmin yapabilmesi nedeniyle ne çıkmaktadır. Zaman serisi tahminlerinde ARIMA modeli, yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Otoregresif (AR), Entegrasyon (I) ve Hareketli Ortalama (MA) bileşenlerinden oluşan ARIMA modeli, ağırlıklı hareketli ortalamalar, fark alma işlemi ve geçmiş verileri kullanarak zaman serisindeki desenleri belirlemektedir ve geleceğe yönelik tahminler yapmaktadır (Dar vd. 2024). Fark alma işlemi, verideki trendi ve mevsimsel olmayan sistematik değişimleri arındırarak modelin geçmiş hatalar üzerinden tahmin yapabilmesine olanak tanımaktadır. Bu işlem, durağan olmayan verilerin analiz edilebilmesini sağladığı için ARIMA' yı geleneksel yöntemlerden ayırmaktadır. Box-Jenkins modeli olan ARIMA modelinde öncelikle durağanlık için otokorelasyon (ACF) ve kısmi otokorelasyon (PACF) grafikleriyle değerlendirme yapılmaktadır. Bu değerlendirme sonrasında, p, d ve q değerleri belirlenir ve model tahmini yapılmaktadır (Yıldız vd.

2025). Polat vd. (2023) Türkiye'nin ithalat verileri kullanılarak gelecekteki yıllar açısından hammadde kritikliğini belirlemek için Zaman Serisi Analizi modellerinden biri olan Üstel Düzeltme Tahmini kullanmışlardır. Bu tahmin değerlerindeki eğilime göre hammaddenin kritikliği değerlendirilmektedir.

Bir ARIMA modeli, (p, d, q) şeklinde ifade edilir: (Çoruh, 2026)

p: Ototegresif (AR) terimlerinin sayısı.

d: Seriyi durağan hale getirmek için kaç kez fark alındığı.

q: Hareketli ortalama (MA) terimlerinin sayısı.

3. Bulgular

Madenlerin kategorilere göre üretim trendleri analizi

Metalik maden analizi

2024-2028 tahminlerinde (Ek 1), genel olarak hammaddelerin üretiminde bir artış eğilimi görülmektedir. Tabloda sırayla; ARIMA tahminleri, özellikle bakır, çinko, kurşun gibi hammaddelerde daha temkinli artışlar gösterirken; trend analizinde daha agresif bir büyüme öngörülmektedir. Bazı hammaddeler için (özellikle antımuhan, boksit, kompleks madenler gibi) her iki model de güçlü artışlar öngörmektedir, bu da bu hammaddelerin stratejik önemini ve talep artışını yansıtmaktadır. Bu tahminler, ülkelerin stratejik hammadde politikalarını planlarken önemli olabilir. Üretim artışlarına paralel olarak tedarik zinciri güvenliğinin sağlanması ve çevresel sürdürülebilirlik dikkate alınmalıdır.

1. Bakır (Tüvenan):

ARIMA tahmini: ARIMA modeline göre, bakır üretiminde temkinli bir artış beklenmektedir. Bu durum, küresel bakır talebinin artmasına rağmen arzın daha yavaş büyüyeceğini ve muhtemelen tedarik zincirindeki risklerin ve üretim kısıtlarının dikkate alındığını göstermektedir.

Trend analizi: Trend analizine göre bakır üretiminde daha agresif bir büyüme öngörülüyor. Bu, bakırın dijital ve yeşil teknolojilerdeki kritik rolü nedeniyle talebin hızlı bir şekilde artacağı beklentisini yansıtır. Elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji sistemlerinde bakır talebi yüksek olduğu için bu hammaddenin stratejik önemi vurgulanmaktadır.

2. Çinko (Tüvenan):

ARIMA tahmini: ARIMA modelinde çinko üretiminde de benzer şekilde temkinli bir artış öngörülüyor. Çinko üretimindeki bu daha yavaş artış beklentisi, arz-talep dengesinde yaşanabilecek belirsizlikleri ve madencilik kapasitesindeki sınırlamaları yansıtabilir.

Trend analizi: Trend analizine göre çinko üretimi daha hızlı bir artış gösterecektir. Çinko, çelik kaplamada ve çeşitli sanayi ürünlerinde yaygın olarak

kullanıldığı için talep artışı beklenmektedir. Bu da üretim kapasitesinin artırılmasına yönelik baskı yaratabilir.

3. Kurşun (Tüvenan):

ARIMA tahmini: Kurşun üretiminde ARIMA modeline göre daha sınırlı bir artış beklenmektedir. Kurşun, batarya üretiminde yaygın olarak kullanılır, ancak lityum-iyon bataryaların yükselişi kurşun talebini biraz sınırlayabilir.

Trend analizi: Trend analizine göre ise kurşun üretimi daha güçlü bir artış gösterebilir. Bu durum, kurşunun hala çeşitli endüstrilerde ve enerji depolama sistemlerinde önemli bir rol oynamaya devam edeceği beklentisiyle ilişkilidir.

4. Antimuan:

ARIMA tahmini: Antimuan üretiminde her iki tahmin modeli de güçlü artışlar öngörmektedir. Antimuanın stratejik önemi artmakta olup, özellikle savunma sanayii ve ateşleyici malzemelerde kullanımı, bu hammaddenin kritik rolünü artırmaktadır. ARIMA modelinin tahminlerine göre, bu artış daha ölçülü olsa da sürekli bir büyüme göstermektedir.

Trend analizi: Trend analizine göre antimuan üretimindeki artış daha agresif bir şekilde öngörülmektedir. Bu, antimuanın elektronik ve enerji teknolojilerindeki kullanımının hızla artacağı ve üretim kapasitelerinin artırılması gerektiğini vurgulamaktadır.

5. Boksit:

ARIMA tahmini: Boksit üretiminde ARIMA tahminleri, küresel alüminyum talebine bağlı olarak istikrarlı bir artış öngörmektedir. Boksit, alüminyumun ana hammaddesi olduğundan, bu talep üretime yansımaktadır.

Trend analizi: Trend analizine göre boksit üretimi daha hızlı bir şekilde artacaktır. Alüminyum, özellikle inşaat, otomotiv ve ambalaj sanayinde büyük talep gördüğü için boksit üretimindeki bu artış, sanayi üretim kapasitesinin artırılması gerektiğini işaret etmektedir.

6. Kompleks Madenler:

ARIMA tahmini: ARIMA modeli kompleks maden üretiminde güçlü bir artış öngörmektedir. Bu tür madenlerin işlenmesi ve birden fazla metalin bir arada bulunması, endüstriyel talebi desteklemektedir.

Trend analizi: Trend analizi, kompleks maden üretiminde daha hızlı bir artış öngörmektedir. Özellikle stratejik metallerin bir arada bulunduğu kompleks madenler, teknoloji ve savunma sanayi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu, artan üretim kapasitesine olan ihtiyacı işaret eder.

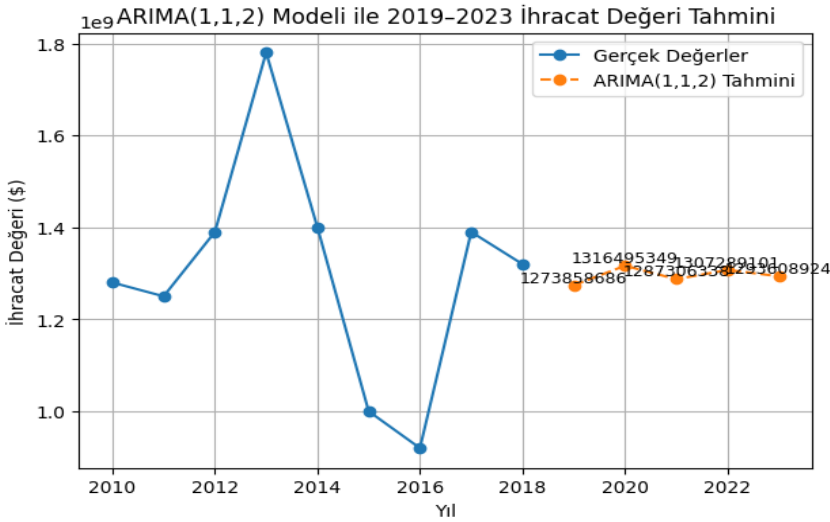
7. Diğer Hammaddeler:

Krom, nikel ve mangan gibi hammaddelerde hem ARIMA hem de trend analizleri artış öngörmektedir. Bu hammaddeler özellikle çelik üretimi, enerji

depolama ve yenilenebilir enerji teknolojilerinde kritik rol oynadıkları için, bu hammaddelere yönelik talep güçlü bir şekilde devam edecektir.

Dış ticaret analizi

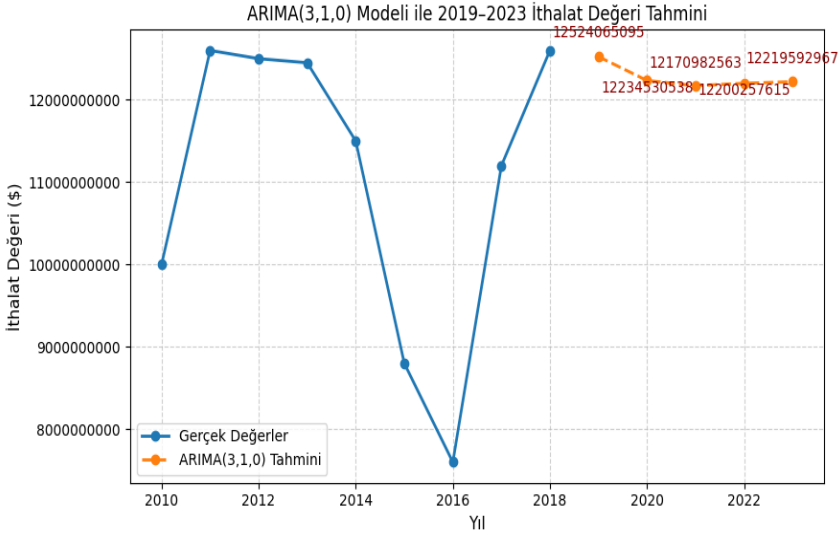
Türkiye'nin 2010–2018 yılları arasındaki metalik cevher ihracatına ilişkin yıllık veriler kullanılarak bir zaman serisi analizi yapılmıştır. Serideki durağanlık sorunu birinci dereceden fark alma işlemiyle giderilmiş ve model için en uygun parametreler $p=1$, $d=1$ ve $q=2$ olarak belirlenmiştir. Şekil 1'e göre tahmin eğrisi genel eğilimle uyumlu olup, sapmaların sınırlı düzeyde kaldığı anlaşılmaktadır. 2016–2018 dönemine ait tahminler için Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) %19 olarak elde edilmiştir.



Şekil 1. İhracat değeri tahmini

Tahmin edilen ihracat değerlerinin, geçmiş yıllara kıyasla daha yatay ve istikrarlı bir yapıdadır. İhracat politikalarının oluşturulmasında orta vadeli planlamaya yönelik daha öngörülebilir ve sağlam bir çerçeve sunmaktadır.

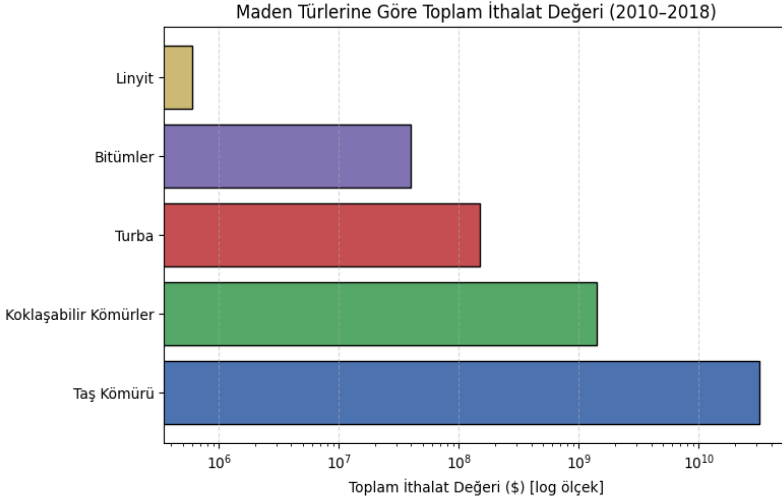
İthalat verileri için yapılan zaman serisi analizinde ise ARIMA (3,1,0) modeli tercih edilmiştir (Şekil 2). Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) %22,45 olarak elde edilmiştir. Gerçek verilerle karşılaştırıldığında, tahminlerin büyük ölçüde yatay bir eğilim gösterdiği ve bu durumun modelin ani ve keskin değişimleri yakalama kapasitesinin sınırlı olduğunu ortaya koyduğu söylenebilir.



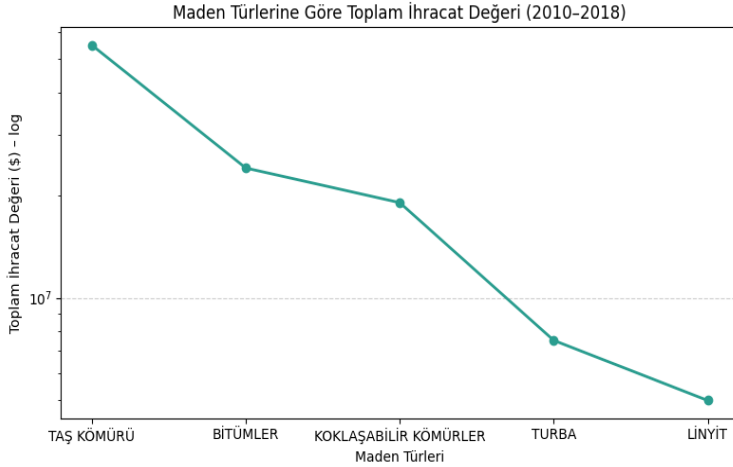
Şekil 2. İthalat Değeri Tahmini

Enerji Hammaddeleri Analizi

Tablo (Ek 2), 2016-2028 yılları arasında dört enerji hammaddesinin (Asfaltit, Bitümlü Şist, Linyit ve Taş Kömürü) üretim verilerini sunmaktadır. 2016-2023 yılları arasında Asfaltit üretiminde dalgalanmalar görülmüş olup, 2024 ve sonrasında üretimde kademeli bir düşüş beklenmektedir. Bitümlü şist üretimi ise 2020 yılında büyük bir düşüş yaşamış, 2023' te yeniden artış gösterse de 2028' e kadar üretimde azalma öngörülmektedir. Linyit üretimi, 2019' dan itibaren düşüş trendine girmiş ve 2024-2028 arasında da bu düşüş devam edecektir. Taş kömürü üretimi de 2016-2023 yılları arasında genel olarak dalgalı bir seyir izlerken, 2024 ve sonrasında hafif bir azalma öngörülmektedir. 2010–2018 döneminde Türkiye'nin enerji hammaddeleri dış ticareti incelendiğinde, ithalatla açık ara en büyük payın taş kömürüne ait olduğu görülmektedir (Şekil 3). Taş kömürü ve onu izleyen koklaşabilir kömürler, diğer maden türlerine kıyasla çok daha yüksek ithalat değerleriyle enerji arzında dışa bağımlılığın temel göstergeleri konumundadır. Turba ve bitümler orta düzeyde ithal edilirken, linyitin düşük ithalatı büyük ölçüde yerli kaynaklarla karşılandığını ortaya koymaktadır. İhracat tarafında (Şekil 4) ise taş kömürü en yüksek geliri sağlamakla birlikte, tüm maden gruplarında ihracat hacimlerinin ithalata kıyasla oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Bitümler görece daha yüksek ihracat potansiyeli sergilese de genel tablo Türkiye'nin enerji hammaddelerinde net ithalatçı bir ülke olduğunu ve dış ticaret fazlasının oldukça kısıtlı düzeyde kaldığını göstermektedir.



Şekil 3. Maden türlerine göre ithalat değeri



Şekil 4. Maden türlerine göre ihracat değeri

Çimento ve İnşaat Hammaddeleri Analizi

Tablo (Ek 3), 2016-2028 yılları arasında çeşitli hammaddelerin (Kalker, Kumtaşı, Dolomit, Marn, Pirofillit, Tras, Şist, Bazalt, Andezit ve diğer inşaat hammaddeleri) üretim miktarlarını göstermektedir. 2016'dan itibaren genel olarak birçok hammadde için üretim miktarlarında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Özellikle Kalker, Dolomit, Bazalt ve Andezit üretiminde yıllar içerisinde artış ve azalışlar dikkat çekmektedir. 2024 ve sonrası için tahminler, çoğu hammadde için üretimde belirgin artışlar öngörmektedir. Örneğin, Kalker ve Kumtaşı üretimi 2028'e kadar

istikrarlı bir şekilde artış göstermektedir. Ancak, bazı hammaddelerde (örneğin Şist ve Pirofillit) üretim miktarları oldukça düşük kalmış ve belirgin bir artış trendi görülmemektedir. Genel olarak, inşaat hammaddelerinin üretiminde büyüme eğilimi devam ederken, bazı spesifik hammaddeler için dalgalı üretim seviyeleri gözlemlenmektedir.

Endüstriyel Hammadde Analizi

Tablo (Ek 4);

Barit: 2024-2028 tahminlerine göre hem trend analizi hem de ARIMA tahminlerinde üretimde belirgin bir artış beklenmektedir. Bu artış, endüstriyel kullanımda artan talebe işaret etmektedir.

Betonit: Betonit üretimi, 2016-2023 yıllarında nispeten sabit kalmış, ancak 2024-2028 yılları için her iki model de bir miktar artış öngörmektedir. Bu, özellikle yapı malzemelerinde kullanım talebinin devam ettiğini göstermektedir.

Boksit: Boksit üretimi, özellikle ARIMA tahminlerinde 2024-2028 yılları arasında önemli bir artış göstermektedir. Boksitin alüminyum üretiminde önemli bir hammadde olması, bu artışın nedeni olabilir.

Diyatomit: Diyatomit üretimi 2016-2023 yıllarında düşük seviyelerde kalmış ve 2024-2028 tahminlerinde de hem trend hem ARIMA modellerinde belirgin bir artış beklenmemektedir.

Feldispat: 2024-2028 tahminlerine göre feldispat üretiminde trend analizine göre bir miktar artış görülse de ARIMA tahminleri daha sınırlı bir artış öngörmektedir. Feldispat, seramik ve cam üretiminde önemli bir hammadde olduğu için üretimde artış devam etmektedir.

Fosfat: Fosfat üretimi 2016-2023 yıllarında sabit bir seviyede kalmış ve 2024-2028 tahminlerinde de büyük bir değişiklik beklenmemektedir. Fosfatın tarımsal gübrede yaygın kullanımı, üretim miktarının sabit kalmasına neden olabilir.

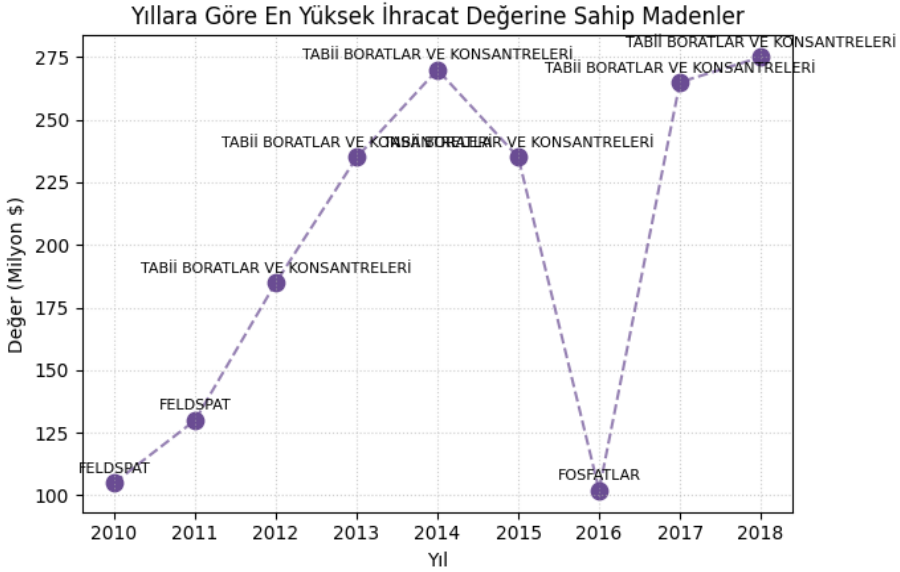
Kaolen ve Kuvars: Her iki hammaddenin üretimi de 2024-2028 döneminde hem trend analizi hem de ARIMA modellerine göre artış göstermektedir. Bu, seramik ve cam üretimindeki artan talebin yansıması olabilir.

Kalsit: Kalsit üretiminde 2024-2028 tahminlerinde özellikle trend analizinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. İnşaat ve endüstriyel kullanımda artan talep bu artışın nedeni olabilir.

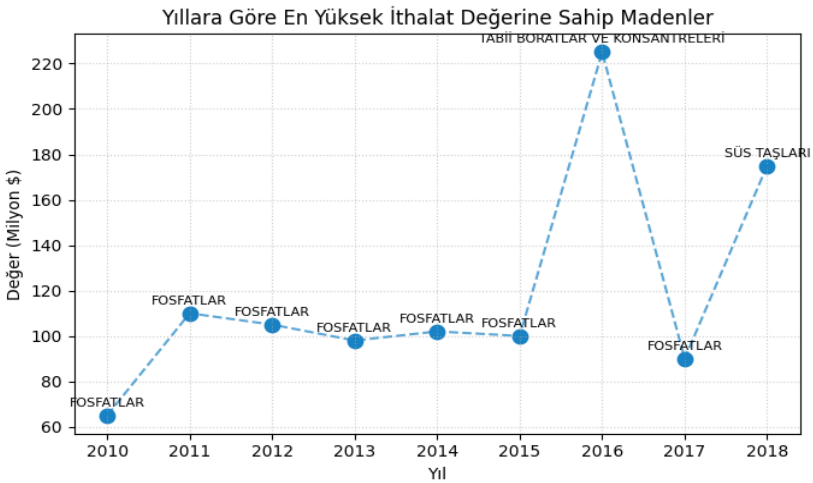
Silis kumu: Silis kumu üretimi her iki tahmin modelinde de 2024-2028 arasında artış öngörmektedir. Silis kumunun cam üretimi ve inşaat sektöründe kullanımı artışa neden olabilir.

Diğer hammaddeler (killer vb.): Diğer hammaddelerin üretiminde 2024-2028 yılları arasında dalgalanmalar gözlemlenmektedir. ARIMA tahminleri bu hammaddeler için daha temkinli artışlar öngörmektedir.

Aşağıdaki grafikte, 2010–2018 yılları arasında her yıl en yüksek ihracat gelirine sahip olan endüstriyel hammadde türü ve buna karşılık gelen değerler gösterilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. En yüksek ihracat değerleri



Şekil 6. En yüksek ithalat değerleri

2010-2018 dönemine ilişkin değerlendirmeler, Türkiye'nin endüstriyel hammadde dış ticaretinde belirgin ürün bazlı eğilimler bulunduğunu ortaya

koymaktadır. 2010 ve 2011 yıllarında en yüksek ihracat geliri feldispat kaynaklıyken, 2012 den itibaren Tabii Boratlar ve Konsantreleri ihracatta baskın konuma yükselmiş; özellikle 2014 ve 2018 yıllarında sırasıyla 265 ve 275 milyon dolar ile zirve değerlerine ulaşmıştır. 2016 yılında borat ihracatında geçici bir gerileme yaşanarak fosfatlar öne çıkmıştır, sonraki yıllarda boratlar yeniden ihracat liderliğini sürdürmüştür. İthalat cephesinde ise 2010-2015 döneminde fosfatlar her yıl yaklaşık 95-110 milyon dolar seviyeleriyle en yüksek ithalat kalemi olurken, 2016 yılında Tabii Boratlar ve Konsantreleri yaklaşık 225 milyon dolarlık ithalat değeriyle dikkat çekici bir sıçrama göstermiş, 2018 yılında ise süs taşları yaklaşık 175 milyon dolarlık ithalat tutarıyla öne çıkmıştır. Bu bulgular, Türkiye'nin uzun yıllar fosfat ithalatına yüksek derecede bağımlı olduğunu, boratlar açısından ise güçlü bir ihracat potansiyeline sahip olmakla birlikte dönemsel olarak ithalat ihtiyacının da ortaya çıkabildiğini göstermekte; ayrıca bazı hammaddelerde ihracat ve ithalat arasındaki birim fiyat farklarının, dış ticaret verimliliğinin önemli bir göstergesi olduğunu ortaya koymaktadır.

4. Sonuç ve Tartışma

Farklı sektörlerdeki hammaddelerin dış ticaret verilerinin ve hammadde bazında da üretim değerlerini incelendiği bu çalışmada, zaman serileri modelleriyle gelecek projeksiyonu oluşturulmaktadır. Genel olarak, artan sanayi ve yenilenebilir enerji yatırımları, birçok hammaddenin üretimini artırırken, tedarik zinciri güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik konularının dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Üretim tahminlerinde kullanılan ARIMA modeli, daha temkinli bir artış öngörmektedir. Bu, küresel ekonomik belirsizlikler, jeopolitik riskler ve tedarik zincirindeki sorunlar dikkate alındığında üretimin daha yavaş büyüyeceği beklentisini yansıtmaktadır. Trend analizi ise daha agresif büyüme öngörülerinde bulunmaktadır. Doğrusal trend analizi serinin genel yönünü başarılı bir şekilde temsil etse de periyodik dalgalanmaları ve otokorelasyon yapısını açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, serideki geçmiş değerlerin ve hata terimlerinin etkisini modele dahil eden ARIMA yöntemi, daha hassas bir tahmin süreci işletilmiştir. Trend analizi, verinin rastsalılığı veya deterministik eğilimini anlamak için bir ön analiz olarak kullanılmıştır. ARIMA modelinde fark alma işleminin uygulanması için teorik zemin oluşturmuştur. Ayrıca, ARIMA 'nın deneme-yanılma (p,d,q) süreci detaylandırılmış ve en iyi modelin MAPE / RMSE değerleri elde edilmiştir. Talep artışının hızlı olacağı, sanayilerdeki hammadde gereksinimlerinin hızla artacağı düşünülmektedir. Özellikle antimon, boksit ve kompleks madenlerdeki talep artışı dikkat çekmektedir. Her iki tahmin de stratejik hammaddelerin kritik önemini vurgulamaktadır ve üretim kapasitelerinin artırılmasının gerekliliğine işaret etmektedir. Özellikle yeşil ve dijital dönüşüm

projeleri, bu hammaddelerin üretimindeki artışın önemli bir itici gücü olacaktır. Endüstriyel hammaddelerde ithalat değerlerinin artacağı düşünülmektedir ve bu hammaddelerin kritikliğini de ortaya koymaktadır. Metalik Cevherler modeli talebin artacağını göstermektedir, daha iyi tahmin için ek veri işleme adımları uygulanmalıdır. Enerji Hammaddeleri modelinde bu hammaddelerde de talebin artacağı düşünülmektedir; bununla birlikte hata oranları sebebiyle güvenilir tahminler sunamamaktadır. Genel olarak, 2024 ve sonrası için hammaddelerde üretim miktarlarının azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu sebeple, birincil üretimden ikincil üretime yönelimin teşvik edilmesi gerekmektedir. Genel olarak tüm modeller için ek değişkenlerin entegrasyonu, yeni modelleme tekniklerinin kullanımı ve daha geniş veri setleri ile eğitimin tekrarlanması önerilmektedir. Dış ticaret verileri incelendiğinde, Türkiye'nin yalnızca belirli maden gruplarında kayda değer bir rekabet avantajına sahip olduğu görülmektedir. Mevcut bulgular, bazı endüstriyel hammaddelerde yüksek katma değer üretilirken, genel verimlilik farklarının beklentilerin altında kaldığını kanıtlamaktadır. Bu çerçevede, birim fiyat farkı düşük olan hammaddelerde üretim kalitesinin artırılması ve ihracat politikalarının yenilenmesi, sektör verimliliğin yükseltilmesi adına kritik bir gerekliliktir. Enerji hammaddeleri özelinde net ithalatçı konumunda olan Türkiye'nin, bu sektörde ticaret fazlası verme imkânı kısıtlı olsa da bitüm gibi ürünlerdeki yüksek ihracat performansı potansiyel gelişim alanlarına işaret etmektedir. Özellikle endüstriyel hammadde ihracatında Tabii Boratlar ve Konsantreleri, ülkenin zengin rezerv yapısına dayanan güçlü dış ticaret kapasitesini yansıtarak hammadde ihracatında öncü konumunu korumaktadır. Gelecek çalışmalar, ARIMA modelinin daha doğru tahminler üretebilmesi için SARIMA (Mevsimsel ARIMA) modeli veya ARIMAX (Eksojen değişkenli ARIMA) gibi genişletilmiş versiyonlar denenmelidir. Elektrikli araçlar, batarya üretimi, yenilenebilir enerji yatırımları gibi sektörlerin hammadde talebi üzerindeki etkileri modellemeye dahil edilmelidir. Büyük veri analiz teknikleri kullanılarak, farklı model kombinasyonları otomatik olarak test edilip en iyi model belirlenebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje No: İHTS2023-06.

Kaynakça

- Bayar, G., & Tokpunar, S. (2014). Türkiye İmalat Sanayi Sektörlerinin İhracatı-Zaman Serisi Analizi. *Sosyoekonomi*, 21(21).
- Çoruh, Y. (2026). Borsa İstanbul'da Petrokimya Sektörü İçin ARIMA Tabanlı Fiyat Tahmini: PETKM Örneği. *Black Sea Journal of Public and Social Science*, (9), 24-31.
- Dar, A. A., Jain, A., Malhotra, M., Farooqi, A. R., Albalawi, O., Khan, M. S., & Hiba. (2024). Time Series analysis with ARIMA for historical stock data and future projections. *Soft Computing*, 1-12.
- Deniz, E. (2025). Marmara Bölgesinde Elleçlenen Yüklerin Analizi ve Tahmin Edilmesi. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 1-15.
- Duran, H. E. (2016). Türkiye'de aramalı, hammadde ithalatı ve ekonomik büyüme. *Gazi iktisat ve işletme dergisi*, 2(3), 89-104.
- Gao, D., Kinouchi, Y., Ito K., and Zhao, X., 2003. Time Series Identifying and Modeling with Neural Networks.
- Göçmen-Polat, E. (2024). Assessment of Critical Raw Materials by Addressing Sustainable Development Goals Using Fuzzy MCDM Approach. In *Harmonizing Global Efforts in Meeting Sustainable Development Goals* (pp. 164-181). IGI Global.
- Güner, Ş. N., & Demir, H. U. (2022). Yapay sinir ağları ve zaman serileri yöntemi ile demir çelik ithalatı tahmini. *Sakarya İktisat Dergisi*, 11(3), 389-397.
- EU Act (2023). https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en
- Kaplan, K., & Çiçek, A. (2025). Estimation of Turkey hazelnut export quantity and prices with ARIMA model. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, 42(1), 27-35.
- Kılınç, Z. S., & Şanlısoy, S. (2025). AB27 Ülkelerindeki Çimento Sektörünün Karbon Emisyonu Tahmini: Yapay Sinir Ağları ve ARIMA Yöntemleriyle Karşılaştırma. *Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 12(2), 345-361.
- Kinaş, Y., & Özdoğan, A. K. (2022). Madencilik'in Gayri Safi Yurtiçi Hasıla Değerinin Zaman Serileri Analizi ile Tahmin Edilerek 2023 Yılında Katkısının Araştırılması. *MT Bilimsel*, (22), 59-65.
- Merdan, K. (2023). Türkiye'de Şekerin Zaman Serileri Analizine Göre Gelecek Eğilimlerinin Belirlenmesi. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 41(3), 497-532.
- Say, H. M., Öner, M., & Polat, E. G. (2024). İkiz dönüşüm kapsamında kritik hammadde ve teknolojilerinin zaman serileri analizi. *Journal of Research in Business*, 9(2), 519-539.

- Uçan, O., & Saraç, M. (2020). İthalat, döviz kuru ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkinin zaman serisi analizi: Türkiye örneği (1994-2018). *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(4), 696-708.
- Uçum, İ. (2016). ARIMA modeli ile Türkiye soya üretim ve ithalat projeksiyonu. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 2(1), 24-31.
- Palit, A.K., Popovic, D., 2005. *Computational Intelligence in Time Series Forecasting: Theory and Engineering Applications*. Springer-Verlag.
- Polat, E. G. Assessing the Roles of Raw Materials in Sustainable Development Goals: Current Situation and Future Prospects. *International Scientific and Vocational Studies Journal*, 7(2), 176-186.
- Polat, E. G., Yücesan, M., & Gül, M. (2023). A comparative framework for criticality assessment of strategic raw materials in Turkey. *Resources Policy*, 82, 103511.
- Yıldız, A., Elevli, S., & Odabas, M. S. (2025). Atık Su Miktarının ARIMA ve Yapay Sinir Ağları ile Tahmini. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(2), 359-368.

EK 1

	Maden Adı	Altın (metal)	Antimuan	Alüminyum (tüvenan)	Boksit (tüvenan)	Bakır (tüvenan)	Çinko (tüvenan)	Demir (tüvenan)	Gümüş (tüvenan)	Krom (tüvenan)	Kurşun (tüvenan)	Kompleks Maden	Mangan (tüvenan)	Nikel (tüvenan)	Pirit
20	24,0	50,00	265,6	989,15	5,094.	399,5	7.137,2	376,	6,066.	473,7	7,633.	46,86	826,28		135
16	3	0,00	14,00	6,00	268,00	37,00	33,00	64	022,00	80,00	905,00	7,00	5,00		
20	23,0	87,94	940,6	1.719.	5.742.	393,5	9.924,5	151,	7.849.	494,4	4.266.	77,89	1.306.	69,96	
17	9	0,00	05,99	140,44	434,00	37,00	55,00	49	500,00	98,81	982,00	5,00	800,00	0,00	
20	28	64,97	445,3	678,13	601,68	284,5	12.560.	151,	1.057.	474,9	3,666.	85,33	1.199.	20,31	
18	4,89	39,29	8,49	4,69	29,00	340,80		49	198,90	83,81	482,87	3,93	943,99	6,13	
20	39	59,32	591,4	2.255.	4.021.	361,8	14.473.	197,	8.666.	368,5	2,600.	114,0	1.361.	368,0	
19	0,10	74,59	480,39	978,47	82,28	328,13		32	418,10	29,12	755,43	37,13	949,75	68,93	
20	42,1	46,71	611,1	2.929.	4.277.	318,8	14.473.	143,	8.666.	372,2	6,324.	101,7	1.361.	103,1	
20	2,26	29,26	679,57	206,05	82,88	328,13		26	418,10	85,29	608,23	65,58	949,75	28,27	
20	39,2	76,15	550,9	2.929.	5.485.	442,4	21.454.	98,2	8.164.	330,1	8,138.	86,75	1.197.	88,18	
21	9	8,90	92,37	679,57	095,00	21,35	846,99	7	598,10	59,15	852,49	4,64	847,76	0,18	
20	31	193,4	637,9	3.637.	5.218.	479,9	20.805.	143,	8.278.	384,7	8,425.	105,4	1.286.	92,68	
22	64,48	97,05	217,76	433,55	23,55	849,93		26	123,18	65,37	975,59	15,46	313,38	3,60	
20	36,2	69,37	639,4	2.934.	5.918.	113,8	16.765.	96,1	8.159.	41,79	7,905.	102,0	1.627.	88,73	
23	5	3,62	33,35	789,85	121,57	15,20	922,24	3	767,46	6,20	431,25	51,46	271,16	0,20	
20	41,5	11764	66248	39005	55119	28838	226542	83,8	91557	10935	82544	11765	15655	13992	
24	268	6	16	97	57269	27484	244220	73,1	96095	8	87287	12379	16310	14792	
20	43,4	12579	67962	42652	07	1	261897	365	58	86877	24	3	45	9	
25	561	1	62	59418	26130	0	86	116	10063		92029	12993	16965	15593	
20	45,3	13393	69677	46300	17	0	279575	55,6	10517		96772	13607	17619	16393	
26	854	6	5	08	61567	24775	279575	756	214	54830	15	6	54	9	
20	47,3	14208	71392	49947	27	9	34	756	10971		10151	14221	18274	17194	
27	146	1	2	54	63716	23421	297252	48,5	042	43558	460	8	09	4	
20	49,2	15022	73106	53594	37	8	82	77	042	43558	460	8	09	4	
28	439	6	99	33580	59070	11331	176622	161,	81237	41671	77439	10993	17416	11808	
20	37,9	55195	60714	33580	96	5	50	339	36	7	77439	14	5	7	
24	957	,5	6	37	58960	11281	185585	171,	80878	41547	76937	11781	18561	14744	
20	39,7	57648	37812	58851	91	8	78	953	63	,7	98	8	24	3	
25	414	43915	9	42045	58851	11232	194549	171,	80521	41547	76782	12570	19705	17680	
20	41,4	54738	0	32	06	2	07	953	48	41424	47	2	51	0	
26	871	34940	0	32	06	2	07	953	48	41424	47	2	51	0	
20	43,2	27799	51974	46277	58741	11182	203512	171,	80165	41300	76734	13358	20849	20615	
27	329	,2	1	79	42	9	35	953	92	,6	22	5	78	7	
20	44,9	22117	49349	50510	58631	11133	212475	171,	79811	41177	76719	14146	21994	23551	
28	786	,8	8	27	98	8	63	953	92	,6	25	9	04	3	

EK 2

	Maden Adı	Asfaltit	Bitümlü Şist	Linyit	Taş kömürü
2016		1567277,00	372028,00	77896648,00	1818664,00
2017		1404858,00	394242,00	84430392,00	1764028,00
2018		1808405,00	385051,00	97077156,00	1620682,00
2019		2187974,00	385165,00	92299437,00	1805188,00
2020		2444416,73	86837,00	84481122,25	1613624,18
2021		1552566,64	0,00	90078076,91	1613624,18
2022		1499605,08	181625,83	102097456,57	1794712,71
2023		1290309,61	46134,10	80478995,04	1423762,66
2024		1613564	38847,6	92761850	1530520
2025		1590038	24840,1	93685614	1496906
2026		1566513	15846,1	94609378	1463291
2027		1542988	10093,4	95533143	1429677
2028		1519463	6423	96456907	1396062
2024		1288719	45920	62417082	1422144
2025		1287131	45706,8	47403064	1420526
2026		1285545	45494,7	34993666	1418911

2027	1283960	45283,5	24803405	1417297
2028	1282378	45073,3	16497787	1415685

EK 3

Maden	Kalker	Kumtaşı	Dolomit	Marn	Pirofillit	Tras	Şist	Diger Çimento	Bazalt (mıcır)	Andezit (mıcır)	Breş + Gnays +	Tuğla Kiremit Kili	Diger Killer*
2016	459247422	20550168	16768920	14006393	678107	2505329	838112	2497630	24161479	4989055	496178	9214698	12529372
2017	478729678	1879742	18718906	15210960	784133	1669286	759538	2888445	12114197	2496752	1400276	8078710	13289489
2018	557028858,6	3316137	26719707,9	19391410,6	832885,33	1505267,7	862812,3	2691427,29	24944744,6	1371668,8	1749195,0	10124370,0	15184330,4
2019	342111703,6	14770003,1	13473782,4	11879582,3	1536835,3	1377779,8	523705,3	16927493,9	19547074,2	1572754,2	1234124	5049640,86	11515022,1
2020	384649122,2	13584393,9	11979582,3	11879365,4	1543583,0	1309796,6	523705,3	17497933,9	22532826,0	1866293,3	3647829,0	5684305,52	11900664,1
2021	453916779,1	15904850,3	13473782,4	13368365,3	1683835,3	1377779,8	455784,7	20467479,9	18939214,2	1572754,2	3382707,7	6622780,23	11429066,1
2022	464462331,9	16320716,8	13467653,1	14447539,8	2154396,5	1610170,6	494722	21352177,1	17839829,8	2036493,4	2770105,4	6068379,51	13112064,8
2023	491323687,1	17166212,7	16386834,8	12166374,8	2203656,5	1828202,8	523218,8	27308484,9	1801986,3	1990543,3	3621921,6	5867596,99	16307130,3
2024	447847893	17495334	12614923	12181254	2503416	1354064	368267	31091022	18187787	1037356	3610807	6178193	16742738
2025	446495492	18508402	11779651	11767366	2742580	1288755	311726	34899275	17837869	770760	3634636	6603293	18782848
2026	445143090	19521470	10944379	11353478	2981744	1223447	255186	38707528	17487951	504164	3577412	7216631	21196036
2027	443790689	20534539	10109107	10939590	3220908	1158138	198645	42515781	17138033	237568	3439136	8018206	23982300
2028	442438288	21547607	9273835	10525702	3460072	1092830	142104	46324034	16788115	29028	3219808	9008020	27141641
2024	461821674	18601557	18098827	12630062	2448004	1731471	478234	30852893	16923355	1986963	4068457	4769008	17154633
2025	461774228	20036901	19810819	13093750	2692352	1634738	433249	34397301	17100764	1983389	4514991	3670419	18002135
2026	461726787	21472244	21522811	13557437	2936700	1538006	388265	37941708	16006874	1979822	4961526	2571830	18849637
2027	461679350	22907588	23234802	14021125	3181048	1441274	343280	41486116	16181548	1976261	5408061	1473241	19697140
2028	461631919	24342932	24946794	14484812	3425395	1344541	298295	45030524	15090388	1972707	5854596	374652	20544642

EK 4

Maden	Alçıtaşı	Barit	Bentonit	Bor	Cirit (Kireç)	Dikit	Diyatomit	Feldispat	Fluorit	Fosfat	Kalsit	Kaolen	Kuvars	Kuvars Kumu	Silis Kumu	Kuvarsit	Diger Killer*
2016	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2017	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2018	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2019	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2020	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2021	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2022	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2023	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2024	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2025	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2026	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2027	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739
2028	10896475,8	110671,6	143153,4	5096065,0	72	153300	970540,9	87218,9	86281,5	9900	676173	122157	119749	141740	263532	263532	362739

2	108	11	143	509			970	87	86								362
0	964	06	153	606		15	540	21	28								739
1	75,8	71,	3,4	5,0	72	33	4,9	8,9	1,5			676	122	119	141	263	263
8	3	6	6	7	2	00	4	4	4	99	00	173	157	749	740	532	532
												6	9	3	8	6,2	6,2
2		11	143	509			970	87	86								362
0	748	06	153	606		15	540	21	28			676	122	119	141	263	263
1	912	71,	3,4	5,0	72	33	4,9	8,9	1,5	99	00	173	157	749	740	532	532
9	8,74	6	6	7	2	00	4	4	4	00	00	6	9	3	8	6,2	6,2
2		23	165	461		10	910	98	87			147	149	226	226	226	344
0	928	81	183	329		77	304	78	21	16		852	752	127	590	521	521
2	086	60,	7,2	1,0	26	31,	4,9	2,0	8,9	50		133	9,1	974	4,1	5,4	5,4
0	4,36	73	3	9	5	51	1	1	4	0		5,74	8	9	9	3	7
2	106	25	220	570		20		10	96			110	178	148	157		429
0	200	66	035	345	11	77	872	53	25	28		850	870	460	771	302	222
2	60,6	73,	9,5	9,4	53	31,	189	7,9	33			23,6	7,7	8,1	9,8	211	211
1	5	36	7	5	2	5	4	4	6	6		4	9	1	0,4	0,4	5
2	106	34	201	570			17	96				127	210				451
0	791	44	893	345		29	785	52	32	27		131	316	832	950	358	256
2	23,0	32,	9,2	9,4	60	76	146	9,1	2,8	17		64,9	4,9	420	639	861	586
2	5	92	7	6	15	26	1,2	9	7	5		1	1	12	65	1,1	9
2	103	21	249			15	947	32	12				107	318	351	351	474
0	367	95	436	447	46	44	874	40	71	27		132	313	909	274	151	813
2	96,0	46,	6,3	153	45	44,	7,1	6,5	13,	97		536	131	487	5,4	3,7	6,1
3	2	42	5	1	39	5	3	3	53	4		74,2	9	6	6	6	3
2					28					32							
0	118	31	240	510	67	21	847	39	11	16		138	273	100	112	332	349
2	676	43	908	974	2,	79	517	67	36	9,		952	052	679	152	734	457
4	13	20	0	9	86	9	4	9,1	60	6		06	9	0	4	3	3
2					33												
0	131	33	248	510	17	22	830	31	11	35		149	296		107	343	363
2	176	93	935	980	80	80	363	74	80	44		658	545	972	167	901	412
5	44	04	8	4	3	74	5	8,3	28	1		03	0	292	8	0	0
2					37					38							
0	146	36	254	510	68	23	813	23	12	71		160	320		102	355	377
2	273	33	851	985	5,	81	209	7	23	2,		364	037	937	183	067	368
6	05	40	6	9	7	62	7	7,5	96	5		00	2	795	2	6	8
2					42					41							
0	163	38	259	510	19	24	796	15	12	98		171	343		366	391	519
2	965	64	141	991	2,	82	055	88	67	3,		069	529	903	234	323	015
7	96	29	4	5	2	49	9	6,7	64	9		98	4	297	3	8	5
2					46					45							
0	184	40	262	510	69	25	778		13	25		181	367		377	405	535
2	255	85	216	997	8,	83	902	79	11	5,		775	021	868	400	279	717
8	18	70	0	0	6	37	0	56	31	4		95	6	799	9	3	3
2					57					30							
0	100	23	266	425	10	15	949	32	97	09		132	469		329	369	497
2	845	54	836	367	1,	56	642	27	69	1,		256	085	826	956	914	490
4	12	75	8	2	3	66	7	4,2	6	4		27	3	433	4	6	3
2					67					32							
0	983	25	284	403	75	15	951	32	21	20		131	625		341	388	520
2	222	14	237	581	1,	68	410	14	75	8,		975	038	743	761	015	939
5	8	03	0	2	5	87	6	2,4	00	8		79	6	379	4	7	3
2					78					34							
0	957	26	301	381	40	15	953	32		32		131	780		353	406	544
2	994	73	637	795	1,	81	178	01	53	6,		695	992	660	566	116	388
6	4	32	2	3	8	08	6	1,2	74	2		32	0	325	325	4	3
2										36							
0	932	28	319	360	89	15	954	31	56	44		131	936		365	424	567
2	766	32	037	009	05	93	946	88	79	3,		414	945	577	371	217	837
7	0	60	4	3	2	30	6	0,5	55	6		84	4	271	4	7	3
2					99												
0	907	29	336	338	70	16	956	31	63	38		131	109		377	442	591
2	537	91	437	223	2,	05	714	75	87	56		134	289	494	176	318	286
8	6	89	7	4	3	51	5	0,4	32	1		37	88	217	4	8	3

6. Bölüm

Meteoritlerin Genel Sınıflandırılması

Ceren KAMİL¹

1. GİRİŞ

Güneş Sistemi, yaklaşık 4,6 milyar yıl önce, galaktik ve yıldızsal evrim süreçleri boyunca fiziksel ve kimyasal açıdan dönüşüme uğramış maddeleri içeren bir moleküler bulut çekirdeğinin kütleçekimsel çökmesi sonucunda oluşmuştur. Dünya ve diğer gezegenler de yaklaşık 4,6 milyar yıl önce Güneş bulutsusu olarak adlandırılan gaz ve toz diskinden meydana gelmiştir. Güneş Sistemi'nin başlangıç koşulları ve erken evrimine ilişkin kayıtlar, Dünya'ya her yıl ulaşan yaklaşık 40.000 ton kozmik kökenli madde içerisinde korunmaktadır. Bu kozmik maddeler, gezegenlerarası toz parçacıkları (IDP) ile asteroit ve kuyruklu yıldız kökenli olup kısmen yıldızlararası katkılar da içerebilen mikroskobik malzemeler olarak tanımlanır. Çalışmalar, bu malzemelerin sürekli üretildiğini ve az da olsa yıldızlararası kökenli bileşenlerle zenginleştiğini göstermektedir (Bradley, 2003; Nittler & Ciesla, 2016; Genge, Van Ginneken & Suttle, 2020; Flynn, 2020).

NASA, 1970'li yılların ortalarından beri yüksek irtifa uçakları kullanarak Dünya'nın stratosferinden IDP'leri toplamaktadır (Flynn, 2020). IDP'lerin atmosferik giriş süreçleri, Güneş Sistemi'nden Dünya'ya ulaşan kozmik madde miktarının belirlenmesi ve bu miktarın anlaşılması açısından kritik bir öneme sahiptir (Plane et al., 2018; Janches et al., 2021). Atmosfere yüksek hızlarla giren IDP'lerin önemli bir bölümü atmosferik ablasyon sonucunda buharlaşırken, daha dayanıklı parçacıklar mikrometeoritler olarak Dünya yüzeyine ulaşmaktadır. Bu süreç, Dünya'ya ulaşan meteorik maddenin miktarını ve bileşimini belirleyen temel mekanizmalardan birini oluşturmaktadır. Atmosferde buharlaşan meteorik materyal, metal atomları, metal iyonları ve atmosfere giren meteoroitlerin ve IDP'lerin ablasyon sırasında açığa çıkan metal buharlarının üst atmosferde yeniden yoğunlaşmasıyla oluşan nanometre boyutlu katı parçacıklar olan meteorik duman parçacıklarının oluşumuna katkı sağlayarak atmosfer kimyasını etkilemektedir. Ayrıca, meteoroit etkileşimleri yalnızca Dünya atmosferiyle sınırlı kalmayıp, atmosfersiz gezegen cisimlerinde ekzosfer oluşumu, yüzey evrimi ve uzay aşınması süreçlerinin anlaşılmasında da önemli bir rol oynamaktadır (Plane et al., 2018; Janches et al., 2021).

¹ Dr., Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği ABD, cerenkamil697@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7311-9550.

Bu parçacıkların kökeni ve evrimi, doğrudan örnekleme çalışmalarının yanı sıra uzaktan algılama ve sayısal modellemeler aracılığıyla da araştırılmaktadır. Kozmik tozun ışık saçılma özellikleri ve dinamik davranışlarının incelenmesi, Güneş Sistemi içerisindeki madde dağılımının ve farklı kaynakların katkılarının belirlenmesinde önemli bilgiler sağlamaktadır (Kolokolova et al., 2004; Nesvorný et al., 2010; Hughes, Duchêne & Matthews, 2018). Bununla birlikte, yıldız oluşum disklerinde gözlenen tozun kimyasal özellikleri, organik bileşikler ve su içeren fazların gezegen oluşumunun erken evrelerinde ilkel gezegenimsi sisteme dahil olduğunu ortaya koymaktadır (Öberg & Bergin, 2021). Kozmik parçacıkların ayrıntılı karakterizasyonu ise bunların bir bölümünün Güneş Sistemi'ne ve Güneş öncesi döneme ait, büyük ölçüde bozulmamış materyalin eşsiz örneklerini temsil ettiğini göstermektedir. Özellikle sulu alterasyon ve termal metamorfizma gibi süreçlerden önemli ölçüde etkilenmemiş olan bu parçacıklar, Güneş ilkel gezegenimsi diskinde gerçekleşen tane ve toz oluşum süreçlerine ilişkin özgün kayıtlar barındırmaktadır. Bu kayıtlar, olivin ve piroksen gibi silikatlar ile Fe-sülfürler başta olmak üzere çeşitli minerallerin Güneş Sistemi'nin iç bölgelerinde gaz fazından yoğunlaştığını ve daha sonra daha düşük sıcaklıkların hüküm sürdüğü dış bölgelere taşındığını göstermektedir. Dış bölgelerde ise karbonca zengin buzların mineral tanelerinin yüzeylerinde yoğunlaşarak birikmesi, Güneş Sistemi'nin erken dönemindeki malzeme taşınımı ve kimyasal evrim süreçlerinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır (Flynn, 2020).

Kozmokimya alanındaki en önemli keşiflerden biri, ilkel meteoritlerin ilkel yıldız popülasyonlarının çevresinde oluşmuş ve yoğunlaşmış mikroskobik mineral taneciklerini barındırdığının ortaya konulmasıdır. Günümüzde Güneş öncesi tanecikler olarak adlandırılan bu materyaller, oluştukları yıldızların çevresinden başlayarak yıldızlararası ortam, Güneş Sistemi'nin oluşumuna yol açan moleküler bulut, Güneş bulutsusu ve meteoritlerin ana gövdeleri gibi birbirinden farklı fiziksel ve kimyasal ortamlardan geçerek varlıklarını korumuştur (Davis, 2011). Güneş öncesi taneciklerin varlığına ilişkin ilk kanıtlar, özellikle soy gazlarda belirlenen olağandışı izotopik bileşimlerden elde edilmiştir. Bu anormal izotopik imzaların hangi materyallerden kaynaklandığını belirlemeye yönelik yaklaşık yirmi yıllık araştırmalar sonucunda, 1980'lerin sonlarında karbonlu kondritler içerisinde elmas, silisyum karbür ve grafit gibi Güneş öncesi mineral fazların keşfedilmesiyle önemli bir dönüm noktasına ulaşılmıştır. Meteoritlerden elde edilen bu taneciklerin mineralojik, dokusal, kimyasal ve izotopik özellikleri, tek tek yıldızlarda gerçekleşen nükleosentez ve toz oluşum süreçlerine ilişkin doğrudan kanıtlar sunmakta ve astronomik gözlemler ile yıldız evrimi modellerinden elde edilen sonuçları tamamlamaktadır. Meteoritlerde korunan Güneş öncesi tanecikler; Güneş kütlelerinin yaklaşık 1,5-4

katı kütleye sahip yıldızların evrimsel süreçlerinin bir aşamasını temsil eden asimptotik dev kol (AGB) yıldızlarının yanı sıra çekirdek çöküşlü süpernovalar ve novalar gibi farklı yıldız kökenlerinden gelen materyalleri de içermektedir. Güneş öncesi tanecikler oldukça nadirdir ve bu taneciklerin en büyüğü birkaç on mikrometre çapına ulaşabilse de, çoğu tanecik mikrometre veya daha küçük boyutlardadır. Bu nedenle, Güneş öncesi taneciklerin laboratuvar ortamında incelenmesi, analitik teknolojideki ilerlemeleri tetiklemiştir ve teknolojideki bu ilerleme, uzamsal çözünürlük ve analitik hassasiyetteki iyileştirmelere bağlıdır (Davis, 2011).

Analitik tekniklerdeki gelişmeler, dünya dışı organik maddenin yanı sıra kozmik toz ve meteoritik materyallerin doğasının, bileşiminin, oluşum süreçlerinin ve evrimsel geçmişinin ayrıntılı biçimde anlaşılmasına önemli katkılar sağlamıştır. Özellikle ilkel meteoritler, IDP'ler ve kuyruklu yıldızlar içerisinde korunmuş olan, Güneş Sistemi'nin oluşumundan önceki yıldız popülasyonlarının çevresinde meydana gelen yıldızlararası kökenli toz taneleri, bu gelişmiş analitik yöntemler sayesinde yüksek çözünürlük ve hassasiyetle incelenebilmektedir. Bu malzemelerin doğrudan karakterizasyonu; elektron mikroskopisi, iyon mikroprob analizleri ve kütle spektrometrisi gibi yüksek çözünürlüklü analitik tekniklerin geliştirilmesiyle daha ayrıntılı ve güvenilir hale gelmiştir. Söz konusu yöntemler, mikrometre ve hatta nanometre ölçeğindeki dünya dışı materyallerin mineralojik, morfolojik, kimyasal, elementel ve izotopik özelliklerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Keşfedilmelerinden bu yana kapsamlı biçimde araştırılan Güneş öncesi tanecikler, modern laboratuvar teknikleriyle ayrıntılı olarak karakterize edilerek Güneş Sistemi öncesinde gerçekleşen yıldızsal süreçlere ilişkin doğrudan kanıtlar sunmaktadır. Bu taneciklerin kimyasal ve özellikle izotopik özelliklerinin ortaya konulması, yalnızca erken Güneş Sistemi materyallerinin kökeninin anlaşılmasına değil, aynı zamanda yıldızlararası ortama madde sağlayan kırmızı dev yıldızlar ve süpernovalardaki nükleosentez süreçlerinin ve bu süreçleri açıklayan modellerin sınanmasına da katkı sağlamaktadır (Goldstein et al., 2003; Reed, 2005; Davis, 2011). Özellikle kütle spektrometrisi, elementel ve izotopik bileşimin belirlenmesinin yanı sıra belirli organik bileşiklerin tanımlanmasında gaz kromatografisi veya sıvı kromatografisi ile kullanılabilir. Spektroskopik yöntemler ise moleküllerin farklı dalga boylarındaki elektromanyetik radyasyonla etkileşimini temel alarak materyallerin kimyasal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesini mümkün kılmaktadır. X-ışınlarından radyo dalgalarına kadar elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinden yararlanılabilmesi, bu yöntemlerin dünya dışı materyallerin karakterizasyonundaki kullanım alanlarını genişletmektedir. Mikroskopik ve

nanoskobik ölçekte ise özellikle taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve geçirimli elektron mikroskopisi (TEM), materyallerin morfolojik, dokusal ve mikroyapısal özelliklerinin yüksek çözünürlükte incelenmesinde temel teknikler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, spektroskopik ve kütle spektrometrik analizlerin mikroskobik incelemelerle birlikte kullanılması, dünya dışı materyallerin morfolojisi, mineralojisi, kimyasal bileşimi ve izotopik özelliklerinin aynı örnek üzerinde bütüncül olarak değerlendirilmesine olanak sağlayarak bu materyallerin kökeni ve evrimsel geçmişinin daha kapsamlı biçimde ortaya konulmasına katkıda bulunmaktadır (Goldstein et al., 2003; Reed, 2005; Lee, 2010; Davis, 2011; Kebukawa, Yeşiltaş & Glotch, 2024).

Meteoritler, Güneş Sistemi'nin erken evresinden günümüze ulaşan en ilkel katı uzay malzemeleri arasında yer almakta olup, mineralojik ve kimyasal özelliklerine göre sistematik olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma yaklaşımı, yalnızca meteoritlerin tanımlanmasını değil, aynı zamanda erken Güneş Sistemi'nde gerçekleşen ayrışma, termal metamorfizma ve akışkan etkileşim süreçlerinin anlaşılmasını da mümkün kılmaktadır (Hutchison, 2004; Nittler & Ciesla, 2016).

Özetle, Güneş öncesi tanecikler, IDP'ler ve meteoritler, Güneş Sistemi'nin oluşumu ve evrimine ilişkin çok katmanlı bilgi sunan kozmik arşivlerdir. Modern gözlemsel, deneysel ve teorik çalışmalar, bu materyallerin yalnızca yerel Güneş Sistemi süreçlerini değil, aynı zamanda yıldızlararası madde katkısını ve gezegen oluşum disklerindeki kimyasal evrimi de temsil ettiğini ortaya koymaktadır.

2. METEORİTLERİN TARİHSEL ÖNEMİ VE SINIFLANDIRMA SÜRECİNİN GELİŞİMİ

Meteoritler, insanlık tarihi boyunca dikkat çekmiş olup bilimsel olarak tanımlanmaları oldukça geç bir dönemde mümkün olmuştur. İlk dönemlerde gökten düşen taşlar çoğunlukla doğaüstü olaylarla ilişkilendirilmiş, kutsal veya uğursuz nesneler olarak yorumlanmıştır (Marvin, 1996; Marvin, 2006; McCall, Bowden & Howarth, 2006; Norton & Chitwood, 2008). Örneğin 1492 Ensisheim meteoriti dönemin halkı tarafından felaket işareti olarak algılanmış, buna karşın Kutsal Roma İmparatoru Maximilian I tarafından kutsal bir obje kabul edilerek kiliseye yerleştirilmiştir (Rowland, 1990; AMNH, 2026). Bu dinsel ve kültürel atıfların yanı sıra antik toplumlar, meteoritik demiri nadir ve kutsal bir hammadde olarak işlemişlerdir; bunun en somut örneği Mısır kralı Tutankhamun'un mezarında bulunan ve meteoritik Fe-Ni alaşımından yapıldığı bilimsel olarak kanıtlanan demir hançerdir (Comelli et al., 2016).

15. yüzyılın sonundaki Ensisheim (1492) ve 16. yüzyıldaki Siena (1566) olayları Avrupa'da dikkat çekmiş olsa da meteoritlerin Dünya dışı kökeni uzun

süre kabul edilmemiştir. Bu cisimler genellikle “sıradışı taşlar” olarak değerlendirilmiş ve sistematik bir sınıflandırmaya tabi tutulmamıştır (Marvin, 1996; Marvin, 2006; McCall, Bowden & Howarth, 2006). Modern bilimsel yaklaşımın başlangıcı, Ernst Florens Friedrich Chladni’nin 1794 yılında yayımladığı çalışmayla gerçekleşmiştir. Chladni, gökten taş düşmesi olgusunun gerçek olduğunu ve bu cisimlerin kozmik kökenli olduğunu ileri sürmüştür (Chladni, 1794).

Modern meteor biliminin ortaya çıkmasıyla birlikte, 19. yüzyıldan itibaren meteoritler kimyasal ve mineralojik özelliklerine göre sistematik olarak sınıflandırılmaya başlanmıştır. Bu süreçte meteoritler temel olarak demirli (sideritler), taşsı (aerolitler) ve taşsı-demirli gruplar altında toplanmıştır. Yapılan kapsamlı mineralojik analizler, meteoritlerin metal oranları, manyetik özellikleri ve içerdikleri Fe-Ni alaşımları (kamasit, taenit) ile silikat mineralleri (olivin, piroksen) açısından büyük bir çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymuştur (Mason, 1962; Buchwald, 1975). Buna ek olarak, meteoritlerin kimyasal bileşimine dayalı ilk sınıflandırma demirleri kimyasal olarak analiz eden Farrington (1907) tarafından yapılmıştır (Farrington, 1907).

Taşsı meteoritler yüksek oranda silikat mineralleri içerirken, 19. yüzyılda Wilhelm von Haidinger ve Gustav Tschermak gibi Viyana ekolü mineralogları mikroskopik analizler yoluyla bu grubu kendi içinde daha detaylı mineralojik ve dokusal alt sınıflara ayırmışlardır. Meteoritlerin taşsı, demirli ve taşsı-demirli olarak üç ana gruba ayrılması sürecinin ardından gelişen bu petrografik çalışmalar, modern sınıflandırma sistemlerinin temelini oluşturmuştur (Prior, 1920; Prior, 1923; Merrill, 1929; Marvin, 1996).

Demirli meteoritlerin en belirgin özelliklerinden biri, yüksek oranda nikel (Ni) içermeleridir. Yapılan laboratuvar analizleri, bu meteoritlerde nikel oranının genellikle %5-20 arasında değiştiğini, Oktibbeha County meteoriti gibi bazı örneklerde ise %60’a kadar ulaşabildiğini göstermektedir (Buchwald, 1975). Dünya’daki doğal demir oluşumlarında nikel bu kadar yüksek oranlarda bulunmadığından ve kamasit ile taenit gibi Fe-Ni alaşımları yaygın olarak görülmediğinden, bu özellik demirli meteoritlerin Dünya kökenli olmadığını ortaya koyan önemli kanıtlardan biridir. Demirli meteoritlerin bir diğer ayırt edici özelliği ise kesitlerinde görülen Widmanstätten deseni. Bu karakteristik desen, Fe-Ni alaşımlarının çok yavaş soğuması sonucu oluşur. Bu kadar yavaş bir soğuma süreci Dünya’da gerçekleşmez; ancak erken Güneş Sistemi’nde farklılaşmış asteroit ve gezegenimsilerin metalik çekirdeklerinde mümkün olabilir. Bu nedenle Widmanstätten deseni, demirli meteoritlerin bu gökcisimlerinin çekirdeklerinden koparak günümüze ulaşmış olabileceğini düşündürmektedir (Buchwald, 1975).

Yaklaşık eşit olarak demir ve silikatlardan oluşan taşı-demirli meteoritler (pallasitler ve mezosideritler), metal ve silikat fazlarının birlikte bulunmasıyla, asteroitlerin iç yapılarına dair önemli ipuçları sunmuştur. Pallasitler, erimiş ve farklılaşmış asteroit ana gövdelerinde metal çekirdek ile silikat manto arasındaki sınır bölgelerinde oluşmuştur. Mezosideritler ise erken Güneş Sistemi'nde meydana gelen şiddetli çarpışmalar sonucunda oluşan çarpma erimesi süreçleriyle meydana gelmiştir. Bu nedenle, çok sayıda farklı ana gövdeden gelen malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşmuş karışık bir meteorit grubu olarak değerlendirilmektedir (Norton & Chitwood, 2008).

19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında polarizan mikroskopların kullanımı, kondritik meteoritlerde kondrül yapılarının detaylı incelenmesini sağlamış ve meteoritlerin oluşum süreçlerine dair önemli veriler üretmiştir. Bu gelişmeler ışığında meteoritler; taşı (kondrit ve akondrit), demirli ve taşı-demirli olarak sistematik bir şekilde sınıflandırılmıştır (Prior, 1920). İlerleyen dönemlerde gelişen modern kimyasal ve mineralojik analiz yöntemleriyle bu sınıflandırma, daha detaylı alt gruplara ayrılmıştır (Mason, 1962; Keil, 1968).

20. yüzyılda karbonlu kondritler, organik bileşikler ve uçucu elementler açısından yoğun şekilde incelenmiştir (Sephton, 2002; Hellmann et al., 2020). Bu tür meteoritlerin Güneş Sistemi'nin erken dönem kimyasal yapısını anlamada kritik olduğu gösterilmiştir (Alexander, 2017; Kawasaki et al., 2025). Elektron mikroskopisi ve kütle spektrometrisi gibi gelişmiş teknikler sayesinde meteoritlerin mineralojik ve izotopik bileşimleri ayrıntılı olarak analiz edilmiş, bazı örneklerin Mars ve Ay kökenli olabileceği belirlenmiştir (Nyquist et al., 2001; McSween, 2015; Santos et al., 2015; Udry et al., 2020; Huidobro et al., 2021; Herd et al., 2024). Bu dönemde sınıflandırma sistemleri yalnızca mineralojik değil, kimyasal ve izotopik kriterleri de içerecek şekilde genişletilmiştir.

Günümüzde meteorit sınıflandırmaları, Meteoritical Society ve Meteoritical Bulletin Database (Meteorit Topluluğu ve Meteorit Bülteni Veritabanı) tarafından standartlaştırılmakta olup mineralojik, petrografik, kimyasal ve izotopik veriler birlikte değerlendirilmektedir. Bu sistemde karbonlu kondritler (CI, CM, CO, CV vb.), sıradan kondritler (H, L, LL), enstatit kondritler (EH, EL), akondritler (HED, angritler, Mars kökenli meteoritler), demirli ve taşı-demirli meteoritler (pallasitler, mezosideritler) temel grupları oluşturur (Weisberg, McCoy & Krot, 2006).

Modern uzay görevleri (Hayabusa, Hayabusa2 ve OSIRIS-REx) meteorit bilimine doğrudan örnek analizleri kazandırmış ve özellikle karbonlu ve taşı cisimlerin kökenine ilişkin bilgileri önemli ölçüde geliştirmiştir (NASA, 2026a, b, c). Bu çalışmalar, meteoritlerin yalnızca Dünya'ya düşen kaya parçaları

olmadığını, aynı zamanda gezegen oluşum süreçlerinin doğrudan kayıtlarını taşıyan kozmik arşivler olduğunu göstermektedir.

Özet olarak meteoritlerin önemi, insanlığın doğa olaylarını yorumlama biçiminden modern bilimsel yöntemle geçişini açıkça yansıtmaktadır. Antik dönemlerde mitolojik açıklamalarla anlaşılan bu cisimler, Chladni'nin öncü yaklaşımı ve 19. yüzyıl sınıflandırmalarıyla bilimsel temele oturmuş, 20. ve 21. yüzyılda ise gelişmiş analitik teknikler ve uzay görevleri sayesinde Güneş Sistemi evrimini anlamada temel veri kaynaklarından biri haline gelmiştir (Chladni, 1794; Marvin, 1996; Weisberg, McCoy & Krot, 2006). Oksijen izotop analizleri gibi modern yöntemler ise meteoritlerin köken bölgelerinin belirlenmesinde kritik rol oynayarak, asteroit-meteorit ilişkisini doğrudan kurabilir hale getirmiştir (Clayton & Mayeda, 1996; Sephton, 2002).

3. METEORİTLERİN SINIFLANDIRILMASINDA KULLANILAN TEMEL ÖLÇÜTLER

Meteoritler, farklı özelliklerine göre çeşitli biçimlerde sınıflandırılır ve bu sınıflandırmalar önemli bilimsel bilgiler sağlar. Gözlemlenen bir düşme olayıyla ilişkilendirilebilen meteoritler “düşen/düşme”, ilişkilendirilemeyenler ise “bulunan/buluntu” olarak adlandırılır. Bu ayrım önemlidir; çünkü buluntu meteoritler Dünya’da daha uzun süre kaldıkları için karasal ortamla kimyasal etkileşime uğrayabilir. Bu nedenle, bu meteoritlerin kimyasal özellikleri yorumlanırken karasal değişimlerin etkisi dikkate alınmalıdır. Meteoritler, genellikle bulundukları veya düştükleri coğrafi bölgenin adıyla isimlendirilmektedir. Örneğin, Allende meteoriti adını Meksika’daki Pueblito de Allende yerleşim yerine düşmesinden almıştır (Weisberg, McCoy & Krot, 2006).

Meteoritler, genel olarak taşı, demirli ve taşı-demirli olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Ancak bu sınıflandırma, yalnızca meteoritlerin temel bileşimini yansıtan genel bir tanımlama olup sınırlı bilgi sunmaktadır. Daha kapsamlı ve bilimsel açıdan anlamlı bir yaklaşım ise meteoritlerin oluşum ve evrim süreçleri dikkate alınarak kondritler (farklılaşmamış meteoritler) ve akondritler (farklılaşmış meteoritler) şeklinde sınıflandırılmasıdır. Daha kapsamlı bir sınıflandırmaya göre kondritler, yüksek derecede uçucu elementler dışında Güneş’e benzer kimyasal bileşime sahip olan ve gezegensel farklılaşma süreçlerinden geçmemiş asteroitlerden, muhtemelen bazı kuyruklu yıldızlardan köken alan meteoritlerdir. Buna karşılık akondritler, farklılaşmış asteroitler ile Mars ve Ay gibi gezegensel cisimlerden kaynaklanan magmatik kayalar, kısmi eriyik ürünleri, eriyik kalıntıları veya bu kayaların breşlerinden oluşmaktadır. Bununla birlikte, bazı meteoritler magmatik ya da yeniden kristallenmiş olmaları nedeniyle akondritik dokular sergilemelerine rağmen, kimyasal bileşimleri

bakımından ilkel kondritlerle önemli benzerlikler göstermektedir. Bu meteoritler, kondritik dokuya sahip olmamakla birlikte, diğer akondritlere kıyasla ilkel kondritik ana kayalarından daha yakın özellikler taşımaları nedeniyle ilkel akondritler olarak adlandırılmaktadır (Weisberg, McCoy & Krot, 2006).

Meteoritlerin sınıflandırılması; mineralojik ve petrografik özellikleri ile tüm kayaç kimyası ve oksijen izotopik bileşimlerinin birlikte değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu temel ölçütler doğrultusunda, meteoritlerin kökeni, oluşum süreçleri ve ana gövde özelliklerini daha iyi yansıtabilmek amacıyla zaman içerisinde farklı sınıflandırma sistemleri geliştirilmiştir. Alt düzey gruplandırmalarda genel bir görüş birliği bulunmasına karşın, üst düzey sınıflandırmalarda köken, oluşum süreçleri, oksijen izotop bileşimi ve ana gövde gibi ölçütlerin esas alınması nedeniyle farklı yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Buna bağlı olarak sınıflandırmada kullanılan terminoloji de zamanla değişmiş, özellikle kondritler ile akondritlerin sınıflandırılması birbirinden bağımsız olarak gelişmiştir. Günümüzde yaygın olarak kabul gören sınıflandırma sisteminde meteoritler, kondritler ve kondrit olmayan meteoritler olmak üzere iki ana gruba ayrılmakta; kondrit olmayan meteoritler ise akondritler, ilkel akondritler, taşı-demirli meteoritler ve demirli meteoritler olarak sınıflandırılmaktadır (Weisberg, McCoy & Krot, 2006).

Bir meteoritin petrografik karakteri, yani dokusu, minerallerin türü ve bolluğu, yoğunlukları ve eğer varsa kondrüllerinin yapısı ile dağılımı öncelikle incelenmelidir. Petrografik incelemeler, meteoritlerin sınıflandırılmasında büyük kolaylık sağlar. Örneğin, pallasitler, demir ve olivin kristallerinin karakteristik birlikteliği sayesinde genellikle gözle veya basit mikroskobik incelemelerle ayırt edilebilir. Buna karşın, karbonlu kondritler çok daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve yalnızca gözlem yoluyla sınıflandırılmaz. Bu tür meteoritlerin doğru şekilde tanımlanabilmesi için spektroskopik analizler, mikroskobik incelemeler ve kimyasal bileşim ölçümleri gibi detaylı yöntemler gereklidir. Bu yöntemler, meteoritin mineralojik yapısını, organik ve inorganik bileşenlerini ortaya koyarak, onun kökeni ve oluşum süreçleri hakkında önemli bilgiler sağlar.

İnce kesit optik mikroskopisi, kondrüllerin varlığı veya yokluğu, Ca-Al açısından zengin kapanımlar (CAI'ler), matris özellikleri ve tane boyutları gibi temel petrografik parametrelerin belirlenmesini sağlar. Optik mikroskopi gibi temel ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile elektron prob mikro analizi (EPMA) gibi ileri mikroskobik yöntemler ise metal-sülfür fazlarının ayırt edilmesi, mineral kimyasının belirlenmesi ve şok etkilerinin tanımlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu petrografik ve mikroyapısal veriler, meteoritlerin sınıflandırılmasının yanı sıra termal ve şok geçmişlerinin yorumlanmasına da katkı sağlar (Stöffler, Keil & Scott, 1991; Rubin & Scott,

1997; Kimura et al., 2003; Weisberg, McCoy & Krot, 2006). Bu yaklaşımın bir örneği olarak, Vigarano türü karbonlu kondrit NWA 5508 üzerinde gerçekleştirilen petrografik ve SEM-EDS analizleri ile CAI yapıları, kondrüller ve matris dokusu ayrıntılı olarak karakterize edilmiş ve meteoritin mineralojik özellikleri ortaya konmuştur (Kamil, Unsalan & Candan, 2026).

Kimyasal analizler, meteoritleri ana ve alt gruplara ayırmada önemli bilgiler sağlar. Ana elementler (Si, Mg, Fe, Ca, Al) ve iz elementler, indüktif olarak eşleştirilmiş plazma-kütle spektrometrisi (ICP-MS) ve X-ışını floresans spektroskopisi (XRF) gibi yöntemlerle ölçülür. Özellikle nadir toprak elementleri (REE) ve element oranları, meteoritin erken Güneş Sistemi süreçlerinde maruz kaldığı termal ve uçucu element kaybı etkilerini yansıtır. Bu veriler, örneğin sıradan kondritlerin H, L ve LL alt gruplarına ayrılmasında veya karbonlu kondritlerin alterasyon geçişinin incelenmesinde kullanılır (Wasson & Kallemeyn, 1988; Kallemeyn et al., 1989; McDonough & Sun, 1995; Friedrich, Wang & Lipschutz, 2002; Weisberg, McCoy & Krot, 2006; Andronikov et al., 2013; Jacquet et al., 2013; Guda et al., 2021).

İzotop jeokimyası, meteoritlerin kökenini ve yaşını belirlemede merkezi bir yöntemdir. Oksijen izotopları ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$) farklı meteorit grupları için karakteristik üç-izotop desenleri gösterir ve ana gövde belirlemede kullanılır (Clayton, Onuma & Mayeda, 1976). Radyometrik kronometreler, örneğin Pb-Pb, ^{26}Al - ^{26}Mg , ^{182}Hf - ^{182}W , meteoritin oluşum ve termal evrim zamanlarını hassas şekilde belirler. Bu yöntemler, özellikle CAI'lerin yaş tayini ve erken Güneş Sistemi'nin termal tarihçesinin anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir (Lee, Papanastassiou & Wasserburg, 1976; Connelly et al., 2012).

Son olarak, fiziksel özellikler meteoritlerin sınıflandırmasında destekleyici bilgiler sağlar. Yoğunluk, gözeneklilik (porozite) ve manyetik özelliklerinin ölçümleri, örneğin sıradan kondritler ile karbonlu kondritlerin ayrımında yararlıdır. Ayrıca bu ölçümler, örneğin metalik Fe-Ni bolluğu veya ana gövde iç yapısı hakkında ön bilgi verir ve özellikle örnek sayısı az olan veya yeni bulunan örneklerde hızlı ön sınıflandırma aracı olarak kullanılır (Consolmagno, Britt & Macke, 2008; Macke, Consolmagno & Britt, 2011; Kohout et al., 2014).

Özetle, günümüzde modern meteorit sınıflandırması, bu bütünleşmiş ölçütlerin kullanımına dayanır. Çünkü tek bir kriter çoğu zaman yanıltıcı olabilir. Petrografik olarak benzer görünen örnekler, kimyasal veya izotopik olarak farklı ana gövdelere ait olabilir. Bu nedenle petrografi, kimya, izotop jeokimyası ve fiziksel ölçümler birlikte değerlendirilerek hem tip hem de köken bilgisi sağlanır.

4. GENEL METEORİT GRUPLARI

Asteroit, meteorit, meteor ve meteorit terimleri birbirinden tamamen farklı kavramları ifade eder. Asteroitler, çoğunlukla Mars-Jüpiter arasında olduğu bilinen Asteroit kuşağında yer alan ve atmosferlerinin olmadığı bilinen büyüklü küçüklü gök cisimleridir. Bu cisimlerden kopan parçalar meteorit olarak adlandırılırken, bu parçaların Dünya atmosferine girdiklerinde sürtünme ve ısınma sonucu ışık olayı oluşturması meteor olarak tanımlanır. Atmosferi geçerek yeryüzüne ulaşan kısım ise meteorit olarak isimlendirilir. Meteoritler üzerine yapılan çalışmalar, gezegen bilimi ve kozmokimya açısından kritik veriler sunarak Güneş Sistemi'nin oluşum ve evrim süreçlerinin anlaşılmasına önemli katkı sağlar. Bunun yanında, meteoritler organik bileşiklerin kökeni ve erken biyokimyasal süreçler açısından da önemli ipuçları sunmaktadır (Sephton, 2002; Weisberg, McCoy & Krot, 2006; Davis, 2011).

Meteoritler, gözlemlenebilirlik durumuna göre “düşen/düşme” ve “bulunan/bulutnu” olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Düşen meteoritler, atmosferik giriş anı gözlem veya kayıt altına alınabilen örneklerdir ve bu özellikleri sayesinde düşme koşulları bilindiğinden bilimsel açıdan daha ayrıntılı incelenebilirler. Bulunan meteoritler ise düşüşü gözlemlenmemiş, sonradan tespit edilen örnekleri ifade eder. Meteoritler genellikle bulundukları coğrafi bölgeye göre (postane varsa) adlandırılır (Meteoritical Society Nomenclature Committee, 2026) ve uluslararası veri tabanlarında sınıflandırma, kimyasal özellikler ve keşif bilgileriyle birlikte kayıt altına alınır. Bu kayıtların en kapsamlı örneği, Meteoritical Society (Meteorit Topluluğu) tarafından yönetilen Meteoritical Bulletin Database (Meteorit Bülteni Veritabanı)'dır (The Meteoritical Society, 2026).

Kimyasal ve yapısal özelliklerine göre meteoritler taşı, demirli ve taşı-demirli olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Taşı-demirli meteoritler silikat mineralleri ile Fe-Ni metal fazlarını yaklaşık eşit oranlarda içerirken, taşı meteoritler tüm meteorit düşmelerinin büyük çoğunluğunu oluşturur. Taşı meteoritler kendi içinde kondritler ve akondritler olarak sınıflandırılır. Kondritler, kondrül adı verilen yuvarlakımsı silikat yapıları içeren ve büyük ölçüde erime geçirmemiş, ilkel kimyasal özelliklerini koruyan meteoritlerdir. Bu özellikleri nedeniyle Güneş Sistemi'nin erken dönemine ait en temel kayıtları temsil ederler. Yapılan çalışmalar, kondritlerin önemli bir kısmının oluşumdan sonra sınırlı termal ve kimyasal değişim geçirdiğini göstermektedir (ASU, 2026a, b).

4.1. Demirli Meteoritler

Demirli meteoritler, yüksek Ni içeriği (genellikle $\geq$ %4) sayesinde yersel kayalardan kolaylıkla ayırt edilir ve gözlemlenen meteorit düşmelerinin %5'inden daha azını oluşturur (Buchwald, 1975; ASU, 2026c). En büyük demirli

meteorit örneği, 1920 yılında Namibya'nın Grootfontein bölgesinde keşfedilen yaklaşık 60 ton kütleli "Hoba meteoriti"dir (Norton and Chitwood, 2008). Bu meteoritlerin büyük çoğunluğunun, farklılaşmış asteroitlerin çekirdeklerinden türediği düşünülmektedir ve temel bileşimleri Fe-Ni alaşımlarından oluşur. Bu durum, Dünya'nın çekirdek bileşimiyle de benzerlik göstermektedir (Buchwald, 1975; Goldstein, Scott & Chabot, 2009).

Demirli meteoritlerde görülen Widmanstätten yapısı, metalik fazların üç boyutlu kristal düzeninin iki boyutlu kesitlerde ortaya çıkan görünümüdür. Bu yapı, demir-nikel (Fe-Ni) alaşımlarını oluşturan kamasit ve taenit fazlarının kısmen erimiş asteroit çekirdeklerinde milyonlarca yıl süren son derece yavaş soğuma ve kristalleşme süreçleri sonucunda oluşmaktadır. Kristalleşme sürecine ve sıcaklığa bağlı olarak, düşük nikel içerikli kamasit (%4-7 Ni), yüksek nikel içerikli taenit matrisi (%20 ile %60 arası Ni) içerisinde lameller halinde gelişerek karakteristik Widmanstätten desenini meydana getirir. Bu denli yavaş bir soğuma Dünya yüzeyinde gerçekleşemediğinden, Widmanstätten yapısı yalnızca meteorit kökenli Fe-Ni alaşımlarında görülmekte ve demirli meteoritlerin tanımlanmasında önemli bir ayırt edici özellik olarak kabul edilmektedir. İlk kez 1804 yılında William Thomson tarafından gözlemlenen bu yapı, 1808 yılında Alois von Widmanstätten tarafından ayrıntılı olarak tanımlanmış ve onun adıyla anılmaya başlanmıştır. Gibeon meteoriti, Widmanstätten deseninin en belirgin şekilde gözlemlendiği örneklerden biridir. Bu yapı, demirli meteoritlerin farklılaşmış asteroit çekirdeklerinden köken aldığını gösteren önemli kanıtlar sunmasının yanı sıra, erken Güneş Sistemi'nde metal-silikat ayrışması, çekirdek oluşumu ve kristalleşme süreçlerinin anlaşılmasına da önemli bilgiler sağlar (Buchwald, 1975; Scott & Wasson, 1975, 1976; Chabot & Haack, 2006; Goldstein, Scott & Chabot, 2009; Goldstein et al., 2022).

4.2. Taşlı-Demirli Meteoritler

Taşlı-demirli meteoritler, nispeten nadir (< %2'den az) olmakla birlikte (Geology.com, 2026; Encyclopaedia Britannica, 2026), içerik bakımından hem silikat mineralleri hem de metal alaşımlarını yaklaşık eşit oranlarda barındıran karmaşık yapıli meteoritlerdir. Bu çift bileşenli doğaları, onların hem taşlı hem de demirli (metalik) meteoritler ile ilişkilendirilmesine yol açar (Weisberg, McCoy & Krot, 2006; Norton & Chitwood, 2008).

Taşlı-demirli meteoritlerin mineralojisi, genellikle olivin kristalleri ile Fe-Ni alaışımının iç içe geçmiş dokularından oluşur. Bu yapılar, taşlı-demirli meteoritlerin farklılaşmış cisimlerin mantosu ile çekirdeği arasındaki sınır bölgelerinden türediğini düşündürmektedir (Norton, 2002). Görsel açıdan da dikkat çekici olmaları nedeniyle, taşlı-demirli meteoritler hem bilimsel

araştırmalarda hem de koleksiyonculukta büyük ilgi görmektedir. Bilimsel açıdan bu meteoritler, gezegenimsilerin iç yapısındaki metal-silikat karışım süreçleri, katastrofik çarpışma ve yeniden birleşme olayları hakkında kritik ipuçları sunar. Bu nedenle, nadirliklerine karşın, erken gezegen farklılaşma ve asteroit çarpışma mekanizmalarının anlaşılması açısından benzersiz örneklerdir (Weisberg, McCoy & Krot, 2006; Yang, Goldstein & Scott, 2010; Tarduno et al., 2012).

4.3. Taşlı Meteoritler

Taşlı meteoritler, meteoritlerin en büyük grubunu oluşturur ve düşen örneklerin yaklaşık %94'ünü temsil eder (ASU, 2026a). Yüzeylerinde atmosferik giriş sırasında oluşan yanık dış (füzyon) kabuğu bulunurken, iç yapıları genellikle gri-kahverengi bir matris içerisinde kristaller ve yer yer yuvarlakımsı kondrüller içerir (Weisberg, McCoy & Krot, 2006). Özellikle karbonlu kondritler, kondrüller ve CAI'lar gibi Güneş Sistemi'nin en eski katı bileşenlerini barındırarak yaklaşık 4,56 milyar yıl öncesine ait önemli bilgiler sunar (Amelin et al., 2002; Scott, 2007; Connelly et al., 2012). Bu meteorit grubu, kondrüllerin yanı sıra kil mineralleri, oksitler ve organik maddelerce zengin karbonlu bir matristen oluşmasıyla karakterize edilir (Sephton, 2002). Bu özellikleri sayesinde karbonlu kondritler, prebiyotik organik bileşiklerin korunabildiği en ilkel meteoritler arasında yer almakta ve yaşamın kimyasal kökenine ilişkin araştırmalarda önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, Murchison meteoriti üzerinde gerçekleştirilen analizlerde bugüne kadar 96 farklı aminoasit tanımlanmıştır (Koga & Naraoka, 2017). Ayrıca, Pizzarello, Cooper & Flynn (2006) tarafından yürütülen kapsamlı bir çalışmada karbonlu kondritler ile IDP'lerde bulunan organik maddeler incelenmiş; aminoasitlerin çeşitliliği, kökeni ve Dünya dışı ortamlardaki oluşum mekanizmaları ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir (Pizzarello, Cooper & Flynn, 2006). Bu özellikleriyle taşlı meteoritler, hem Güneş Sistemi'nin erken evriminin hem de prebiyotik kimyasal süreçlerin anlaşılmasında temel jeokimyasal arşivler olarak kabul edilmektedir.

5. GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

Meteoritlerin sınıflandırılmasında güncel yaklaşımlar hem uluslararası standartlara hem de modern veri tabanlarına dayanmaktadır. Uluslararası Meteorit Bilimi Topluluğu (Meteoritical Society), meteoritlerin bilimsel adlandırılması ve sınıflandırılması konusunda uluslararası kabul görmüş bir otoritedir. Topluluk, yeni meteorit örneklerinin analiz edilmesini, tip numunelerinin bağışlanmasını ve sınıflandırma sonuçlarının "İsimlendirme Komitesi (Nomenclature Committee)" tarafından onaylanmasını gerektiren bir süreç işletir. Onaylanan meteoritler, Meteoritical Bulletin ve Meteoritical

Bulletin Database aracılığıyla yayımlanarak araştırmacıların erişimine sunulur (The Meteoritical Society, 2026).

Meteoritical Bulletin Database (Meteorit Bülteni Veritabanı), dünya genelindeki meteor örnekleri hakkında kapsamlı bilgiler sağlayan bir dijital kaynaktır. Bu veritabanında, mineralojik, petrografik, kimyasal ve izotopik özellikler gibi pek çok veri yer alır ve araştırmacılar meteorların sınıflandırılması, kökeni ve karakterizasyonu için bu kaynağı kullanır. Veritabanı, Catalogue of Meteorites, MetBase ve Antarctic Meteorite Newsletter gibi kaynaklardan gelen bilgileri bir araya getirerek güncel ve doğrulanmış veriler sunar (LPI, 2026).

Son yıllarda geliştirilen sınıflandırma yaklaşımları, asteroitlerin spektral ve albedo verilerini meteorit örneklerinin bileşimiyle ilişkilendirerek yeni bir perspektif kazandırmıştır. Bu yöntem, asteroitlerin C, M ve S kompleksleri gibi spektral sınıflara ayrılmasını ve meteorların kökenlerinin daha kesin şekilde belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Yapılan çalışmalar, asteroit spektral gözlemleri ile meteor örneklerinin kimyasal ve mineralojik verilerini entegre ederek, meteoritlerin sınıflandırılmasında daha kapsamlı ve bütünlümlü bir yaklaşım önermektedir. Bu sayede, asteroitlerin iç yapıları ve bileşimleri hakkında daha derinlemesine bilgiler elde edilir ve meteorların sınıflandırılmasında modern veri odaklı bir perspektif sunulur (Mahlke, Carry & Mattei, 2022).

NASA tarafından yürütülen Psyche görevi, M sınıfı asteroit (16) Psyche ile demirli meteoritler arasındaki olası genetik ilişkiyi ortaya koymayı amaçlayan ilk ayrıntılı uzay görevidir. Görevin temel hedeflerinden biri, 16 Psyche'nin farklılaşmış bir gezegenimsinin açığa çıkmış metalik çekirdeği mi yoksa yüksek metal içeriğine sahip ancak farklılaşmamış ilkel bir cisim mi olduğunu belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda elde edilecek mineralojik, jeokimyasal, manyetik ve jeofizik veriler, demirli meteoritlerin kökenine ilişkin mevcut modellerin test edilmesine ve M sınıfı asteroitler ile demirli meteoritler arasındaki ilişkinin daha güvenilir biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Böylece uzay görevlerinden elde edilen yerinde (in situ) gözlemler, laboratuvar ortamında analiz edilen meteorit örneklerinden elde edilen mineralojik, petrografik ve kimyasal verilerle doğrudan karşılaştırılabilecektir. Bu bütünlümlü yaklaşım, meteorit sınıflandırmasının yalnızca fiziksel ve kimyasal özelliklere değil, aynı zamanda ana gövde özelliklerine ve oluşum süreçlerine dayalı olarak geliştirilmesini mümkün kılacaktır. Sonuç olarak Psyche görevi, modern meteorit sınıflandırma sistemlerinin doğrulanması, asteroit-meteorit eşleştirmelerinin güçlendirilmesi ve Güneş Sistemi'nin erken evrimine ilişkin modellerin geliştirilmesi açısından önemli bir kilometre taşı olarak değerlendirilmektedir (Elkins-Tanton et al., 2022; NASA, 2026d).

Referanslar

- Alexander, C. M. O'D. (2017). The origin of inner Solar System water. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2094), 20150384.
- Amelin, Y., Krot, A. N., Hutcheon, I. D., & Ulyanov, A. A. (2002). Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions. *Science*, 297(5587), 1678-1683.
- American Museum of Natural History (AMNH). (2026). Ernst Chladni and rocks from the sky. In *Cosmic Horizons Curriculum Collection*. Retrieved June 25, 2026, from <https://www.amnh.org/learn-teach/curriculum-collections/cosmic-horizons-book/ernst-chladni-meteoritics>
- Andronikov, A. V., Lauretta, D. S., Connolly, H. C., & Andronikova, I. (2013). Determination of trace-element bulk composition of equilibrated ordinary chondrite meteorite samples by LA-ICP-MS using various reference materials. In 44th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, TX.
- Arizona State University (ASU), Buseck Center for Meteorite Studies. (2026a). Stony meteorites. Retrieved July 26, 2026, from <https://meteorites.asu.edu/stonymeteorites>
- Arizona State University (ASU), Buseck Center for Meteorite Studies. (2026b). Chondrites. Retrieved July 26, 2026, from <https://meteorites.asu.edu/chondrites>
- Arizona State University (ASU), Buseck Center for Meteorite Studies. (2026c). Iron meteorites. Retrieved July 26, 2026, from <https://meteorites.asu.edu/iron-meteorites>
- Bradley, J. P. (2003). Interplanetary dust particles. In Davis A. M. (Ed.), Holland H. D. & Turekian K. K. (Eds.). *Treatise on geochemistry*, vol. 1, pp. 689-711. Elsevier.
- Buchwald, V. F. (1975). *Handbook of iron meteorites: Their history, distribution, composition and structure*. Arizona: State University, Center for Meteorite Studies, and Berkeley: University of California Press.
- Chabot, N. L. & Haack, H. (2006). Evolution of asteroidal cores. In Lauretta, D. S. & McSween Jr. H. Y. (Eds.), *Meteorites and the early solar system II* (pp. 747–771). University of Arizona Press, Tucson, ss. 943.
- Chladni, E. F. F. (1794). Ueber den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen, und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen. Hartknoch, Riga, ss. 63.

- Clayton, R. N., Onuma, N. & Mayeda, T. (1976). A classification of meteorites based on oxygen isotopes, *Earth and Planetary Science Letters*, 30(1), 10-18.
- Clayton, R. N. & Mayeda, T. K. (1996). Oxygen isotope studies of achondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(11), 1999-2017.
- Comelli, D., D'Orazio, M., Folco, L., El-Halwagy, M., Frizzi, T., Alberti, R., et al. (2016). The meteoritic origin of Tutankhamun's iron dagger blade. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(7), 1301-1309.
- Connelly, J. N., Bizzarro, M., Krot, A. N., Nordlund, Å., Wielandt, D. & Ivanova, M. A. (2012). The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science*, 338(6107), 651-655.
- Consolmagno, G. J., Britt, D. T. & Macke, R. J. (2008). The significance of meteorite density and porosity. *Geochemistry*, 68(1), 1-29.
- Davis, A. M. (2011). Stardust in meteorites. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 108(48), 19142-19146.
- Encyclopaedia Britannica. (2026). Stony-iron meteorite. Retrieved June 27, 2026, from <https://www.britannica.com/science/stony-iron-meteorite>
- Elkins-Tanton, L. T., Asphaug, E., Bell III, J. F., Bierson, C. J., Bills, B. G., Bottke, W. F., et al. (2022). Distinguishing the origin of Asteroid (16) Psyche. *Space Science Reviews*, 218, 17.
- Farrington, O. C. (1907). Analysis of iron meteorites, compiled and classified. *Field Columbian Museum Publications*, 120, Geological Series, 3, 59-110.
- Flynn, G. J. (2020). Interplanetary dust particles. In P. Read (Ed.), *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. Oxford Academic, New York, NY.
- Friedrich, J. M., Wang, M.-S., & Lipschutz, M. E. (2002). Comparison of the trace element composition of Tagish Lake with other primitive carbonaceous chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 37(5), 677-686.
- Genge, M. J., Van Ginneken, M., & Suttle, M. D. (2020). Micrometeorites: Insights into the flux, sources and atmospheric entry of extraterrestrial dust at Earth. *Planetary and Space Science*, 187, 104900.
- Geology.com. (2026). Stony-iron meteorites. Retrieved June 27, 2026, from <https://geology.com/meteorites/stony-iron-meteorites.shtml>
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Echlin, P., Joy, D. C., Lyman, C. E., Lifshin, E., Sawyer, L. & Michael, J. R. (2003) *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis* (3rd ed.). Springer, New York, NY, ss. 689.

- Goldstein, J. I., Scott, E. R. D. & Chabot, N. L. (2009). Iron meteorites: Crystallization, thermal history, parent bodies, and origin. *Geochemistry*, 69(4), 293-325.
- Goldstein, J. I., Scott, E. R. D., Winfield, T. B., & Yang, J. (2022). Cooling rates and impact histories of group IAB and other IAB complex iron meteorites inferred from zoned taenite and the cloudy zone. *Meteoritics & Planetary Science*, 57(2), 238-260.
- Guda, L. V., Kravtsova, A. N., Kubrin, S. P., Guda, A. A., Mazuritskiy, M. I., Tereshchenko, A. A., et al. (2021). Complex diagnostics of ordinary chondrites Markovka, Polujamki, Sayh al Uhaymir 001, Dhofar 020, and Jiddat al Harasis 055 by X-ray techniques and Mössbauer spectroscopy. *Meteoritics & Planetary Science*, 56(11), 2191-2210.
- Hellmann, J. L., Hopp, T., Burkhardt, C., & Kleine, T. (2020). Origin of volatile element depletion among carbonaceous chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 549, 116508.
- Herd, C. D. K., Hamilton, J. S. Walton, E. Tornabene, L. L., Lagain, A., Servis, K., et al. (2024). The source craters of the martian meteorites: Implications for the igneous evolution of Mars. *Science Advances*, 10(33), eadn2378.
- Hughes, A. M., Duchêne, G. & Matthews, B. C. (2018). Debris disks: Structure, composition, and variability. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56, 541-591.
- Huidobro, J., Aramendia, J., Arana, G., & Madariaga, J. M. (2021). Geochemical characterization of the NWA 11273 lunar meteorite using nondestructive analytical techniques: Original, shocked, and alteration mineral phases. *ACS Earth and Space Chemistry*, 5(6), 1333-1342.
- Hutchison, R. (2004). *Meteorites: A petrologic, chemical and isotopic synthesis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York, USA, ss. 506.
- Jacquet, E., Paulhiac-Pison, M., Alard, O., Kearsley, A. T., & Gounelle, M. (2013). Trace element geochemistry of CR chondrite metal. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(10), 1981-1999.
- Janches, D., Berezhnoy, A. A., Christou, A. A., Cremonese, G., Hirai, T., Horányi, M., Jasinski, J. M. & Sarantos, M. (2021). Meteoroids as one of the sources for exosphere formation on airless bodies in the inner Solar System. *Space Science Reviews*, 217, 50.
- Kallemeyn, G. W., Rubin, A. E., Wang, D., & Wasson, J. T. (1989). Ordinary chondrites: Bulk compositions, classification, lithophile-element fractionations and composition-petrographic type relationships. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(10), 2747-2767.

- Kamil, C., Unsalan, O., & Candan, O. (2026). Petrographic and SEM-EDS analyses of CAI structures in Vigarano type carbonaceous chondritic meteorite NWA 5508. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 28(83), 268-275.
- Kawasaki, N., Arakawa, S., Miyamoto, Y., Sakamoto, N., Yamamoto, D., Russell, S. S., & Yurimoto, H. (2025). Solar System's earliest solids as tracers of the accretion region of Ryugu and Ivuna-type carbonaceous chondrites. *Communications Earth & Environment*, 6, 537.
- Kebukawa, Y., Yesiltas, M. & Glotch, T. D. (2024). Analytical techniques for identification and characterization of extraterrestrial organic matter. *Elements*, 20(1), 38-44.
- Keil, K. (1968). Mineralogical and chemical relationships among enstatite chondrites. *Journal of Geophysical Research*, 73(22), 6945-6976.
- Kimura, M., Chen, M., Yoshida, Y., El Goresy, A., & Ohtani, E. (2003). Back-transformation of high-pressure phases in a shock melt vein of an H-chondrite during atmospheric passage: Implications for the survival of high-pressure phases after decompression. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(1-2), 141-150.
- Koga, T. & Naraoka, H. (2017). A new family of extraterrestrial amino acids in the Murchison meteorite. *Scientific Reports*, 7, 636.
- Kohout, T., Havrila, K., Tóth, J., Husárik, M., Gritsevich, M., Britt, D., Borovička, J., et al. (2014). Density, porosity and magnetic susceptibility of the Košice meteorite shower and homogeneity of its parent meteoroid. *Planetary and Space Science*, 93-94, 96-100.
- Kolokolova, L., Hanner, M. S., Levasseur-Regourd, A.-C. & Gustafson, B. Å. S. (2004). Physical properties of cometary dust from light scattering and thermal emission. In Festou, M. C., Keller, H. U. & Weaver H. A. (Eds.), *Comets II*, pp. 577-604. University of Arizona Press, Tuscon.
- Lee, T., Papanastassiou, D. A. & Wasserburg, G. J. (1976). Demonstration of ^{26}Mg excess in Allende and evidence for ^{26}Al . *Geophysical Research Letters*, 3(1), 41-44.
- Lee, M. R. (2010). Transmission electron microscopy (TEM) of Earth and planetary materials: A review. *Mineralogical Magazine*, 74(1), 1-16.
- Lunar and Planetary Institute (LPI). (2026). Meteoritical Bulletin database. Retrieved July 26, 2026, from <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>
- Macke, R. J., Consolmagno, G. J., & Britt, D. T. (2011). Density, porosity, and magnetic susceptibility of carbonaceous chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 46(12), 1842-1862.

- Mahlke, M., Carry, B. & Mattei, P.-A. (2022). Asteroid taxonomy from cluster analysis of spectrometry and albedo. *Astronomy & Astrophysics*, 665, A26.
- Marvin, U. B. (1996). Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) and the origins of modern meteorite research. *Meteoritics & Planetary Science*, 31(5), 545-588.
- Marvin, U. B. (2006). Meteorites in history: An overview from the Renaissance to the 20th century. Geological Society, London, Special Publications, 256, 1.
- Mason, B. (1962). *Meteorites*. Wiley, New York.
- Merrill, G. P. (1929). Minerals from Earth and sky. Part I: The story of meteorites. Smithsonian Scientific Series.
- McCall, G. J. H., Bowden, A. J. & Howarth, R. J. (2006). The history of meteoritics and key meteorite collections: Fireballs, falls and finds, Geological Society of London.
- McDonough, W. F., & Sun, S. S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4), 223-253.
- McSween, Jr. H. Y. (2015). Petrology on Mars. *American Mineralogist*, 100(11-12), 2380-2395.
- Meteoritical Society Committee on Meteorite Nomenclature. (2026). Guidelines for meteorite nomenclature. Lunar and Planetary Institute. <https://www.lpi.usra.edu/meteor/docs/nc-guidelines.pdf>
- NASA. (2026a). Hayabusa mission. Retrieved July 26, 2026, from <https://science.nasa.gov/mission/hayabusa/>
- NASA. (2026b). Hayabusa2 mission. Retrieved July 26, 2026, from <https://science.nasa.gov/mission/hayabusa-2/>
- NASA. (2026c). OSIRIS-REx mission. Retrieved July 26, 2026, from <https://science.nasa.gov/mission/osiris-rex/>
- NASA. (2026d). Psyche mission. Retrieved July 26, 2026, from <https://science.nasa.gov/mission/psyche/>
- Nesvorný, D., Jenniskens, P., Levison, H. F., Bottke, W. F., Vokrouhlický, D. & Gounelle, M. (2010). Cometary origin of the zodiacal cloud and carbonaceous micrometeorites. Implications for hot debris disks. *The Astrophysical Journal*, 713, 816-836.
- Nittler, L. R. & Ciesla, F. (2016). Astrophysics with extraterrestrial materials. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 54, 53-93.
- Nyquist, L. E., Bogard, D. D., Shih, C. Y., Greshake, A., Stöffler, D. & Eugster, O. (2001). Ages and geologic histories of Martian meteorites. *Space Science Reviews*, 96, 105-164.

- Norton, O. R. (2002). *The Cambridge encyclopedia of meteorites*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, ss. 374.
- Norton, O. R. & Chitwood, L. A. (2008). *Field guide to meteors and meteorites*. Springer-Verlag London, London, ss. 287.
- Öberg, K. I. & Bergin, E. A. (2021). Astrochemistry and compositions of planetary systems. *Physics Reports*, 893, 1-48.
- Pizzarello, S., Cooper, G. W., & Flynn, G. J. (2006). The nature and distribution of the organic material in carbonaceous chondrites and interplanetary dust particles. In Lauretta, D. S. & McSween Jr., H. Y. (Eds.), *Meteorites and the Early Solar System II* (pp. 625-651). University of Arizona Press.
- Plane, J. M. C., Flynn, G. J., Määtänen, A., Moores, J. E., Poppe, A. R., Carrillo-Sanchez, J. D. & Listowski, C. (2018). Impacts of cosmic dust on planetary atmospheres and surfaces. *Space Science Reviews*, 214, 23.
- Prior G. T. (1920). The classification of meteorites. *Mineralogical Magazine*, 19, 51-63.
- Prior, G. T. (1923). *Catalogue of meteorites: With special reference to those in the British Museum (Natural History)*. British Museum (Natural History).
- Reed, S. J. B. (2005). *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Rowland, I. D. (1990). A contemporary account of the Ensisheim meteorite, 1492. *Meteoritics*, 25(1), 19-22.
- Rubin, A. E., & Scott, E. R. D. (1997). Abee and related EH chondrite impact-melt breccias. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(2), 425-435.
- Santos, A. R., Agee, C. B., McCubbin, F. M., Shearer, C. K., Burger, P. V., Tartèse, R. & Anand, M. (2015). Petrology of igneous clasts in Northwest Africa 7034: Implications for the petrologic diversity of the martian crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 157, 56-85.
- Scott, E. R. D. & Wasson, J. T. (1975). Classification and properties of iron meteorites. *Reviews of Geophysics*, 13(4), 527-546.
- Scott, E. R. D. & Wasson, J. T. (1976). Chemical classification of iron meteorites-VIII. Groups IC, IIE, IIIF and 97 other irons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40(1), 103-108.
- Scott, E. R. D. (2007). Chondrites and the protoplanetary disk. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35(1), 577-620.
- Sephton, M. A. (2002). Organic compounds in carbonaceous meteorites. *Natural Product Reports*, 19(3), 292-311.
- Stöffler, D., Keil, K., & Scott, E. R. D. (1991). Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12), 3845-3867.

- Tarduno, J. A., Cottrell, R. D., Nimmo, F., Hopkins, J., Voronov, J., Erickson, A., Blackman, E., Scott, E. R. D., & McKinley, R. (2012). Evidence for a dynamo in the main group pallasite parent body. *Science*, 338(6109), 939-942.
- The Meteoritical Society. (2026). The Meteoritical Bulletin. Meteoritical Society. Retrieved July 26, 2026, from <https://meteoritical.org/publications/meteoritical-bulletin>
- Udry, A., Howarth, G. H., Herd, C. D. K., Day, J. M. D., Lapen, T. J. & Filiberto, J. (2020). What Martian meteorites reveal about the interior and surface of Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(12), e2020JE006523.
- Yang, J., Goldstein, J. I., & Scott, E. R. D. (2010). Main-group pallasites: Thermal history, relationship to IIIAB irons, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(15), 4471-4492.
- Wasson, J. T. & Kallemeyn, G. W. (1988). Compositions of chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 325(1587), 535-544.
- Weisberg, M. K., McCoy, T. J. & Krot, A. N. (2006). Systematics and evaluation of meteorite classification. In Lauretta D. S. & McSween Jr. H. Y. (Eds.), *Meteorites and the Early Solar System II* (pp. 19-52). University of Arizona Press, Tuscon.