



# TÜRKİYE VE DÜNYADA YER BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Doç.Dr.Ayşe Didem KILIÇ

yaz  
yayınları

# **Türkiye ve Dünyada Yer Bilimleri ve Mühendisliği**

**Editör**

Doç.Dr. Ayşe Didem KILIÇ

**yaz**  
yayınları

2025

## **Türkiye ve Dünyada Yer Bilimleri ve Mühendisliği**

Editör: Doç.Dr. Ayşe Didem KILIÇ

---

### **© YAZ Yayınları**

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

---

E\_ISBN 978-625-8678-51-2

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3  
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

[www.yazyayinlari.com](http://www.yazyayinlari.com)

[yazyayinlari@gmail.com](mailto:yazyayinlari@gmail.com)

## İÇİNDEKİLER

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Kloritoid Mineralinde SEM/EDS Uygulamaları ve Yorumlanması .....</b> | <b>1</b>  |
| <i>Ayşe Didem KILIÇ</i>                                                 |           |
| <b>Sismolojide Makine Öğrenimi Uygulamaları .....</b>                   | <b>17</b> |
| <i>Timur TEZEL</i>                                                      |           |
| <b>Platin Grubu Elementler ve Kullanım Alanları .....</b>               | <b>33</b> |
| <i>Hüseyin SENDİR, Kadir SARIİZ</i>                                     |           |

*"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."*

# **KLORİTOİD MİNERALİNDE SEM/EDS UYGULAMALARI VE YORUMLANMASI**

**Ayşe Didem KILIÇ<sup>1</sup>**

## **1. GİRİŞ**

Pelitik sistem, belirli basınç, sıcaklık ve kimyasal bileşim koşullarında kararlı olan farklı mineral parajenezlerini kapsar. Bu fazlar sistem koşulları içerisinde kararlıdır. Sınırlı sayıda mineral fazı içeren ve dar P–T koşullarındaki sistem içerisinde kloritoid-granat-biyotit, kloritoid-klorit topluluğu düşük serbestlik derecesine sahip mineral topluluğudur. İnce taneli alüminyumca zengin metapelitler, klorit, granat, staurolit, kloritoid, silimanit ve disten gibi indeks minerallerinin varlığı dolayısıyla petrolojik modelleme için önemlidir [1].

Kloritoid  $(\text{Fe,Mg,Mn})_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$  kimyasal formunda bir nezosilikat'tir. Bu mineral, demir bakımından zengin metapelitlerin yaygın minerali olup muskovit, klorit, stavrolit, granat nadiren disten'le birlikte bulunabilir. Bölgesel metamorfizma alanlarında, biyotit-granat parajenezi oluşturan kloritoid nadirdir [2]. Kloritoid+biyotit±granat parajenezine, genellikle kontak metamorfizma alanlarında [3-5], düşük basınç ( $> 30$  °C) [6], orta basınç (25–30 °C) bölgesel Barroviyen zonunda rastlanır [6]. Literatürde, kloritoid + biyotit parajenezinin varlığı mineralin çevresiyle denge halinde büyüdüğüünün işareti olduğundan [4-6], bu mineralin bileşiminin mineralin büyümesi sırasındaki P–T koşullarını

---

<sup>1</sup> Doç. Dr., Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Bölümü, ORCID: 0000-0002-6804-6764

yansıttığı kabul edilir. Basınç, sıcaklık, ortamdaki akışkan bileşimi ve kayaç kütle bileşimi gibi faktörlere bağlı olarak mineral parajenezi değişir [5]. White ve diğerleri [5], kloritoid + biyotit parajenezinin düşük basınç koşullarında (yaklaşık 6 kbar) gerçekleştiğini ifade eder. Bu durumu, biyotitin oluşum reaksiyonunun eğimi ( $dP/dT$ ) ile kanıtlar. Çünkü, kloritoid yokolma reaksiyonunun eğiminden daha az diktir. Dolayısıyla bu iki reaksiyonun  $P < 6$  kbar'da kesiştiğinden kloritoid + biyotitin birlikte bulunması düşük basınçlı kontak metamorfizma ortamlarında mümkün olabilir. Alüminyum ve demir bakımından zengin kayaçlarda, kloritoid, biyotit (+granat) mineral topluluğu görülebilir ki, yüksek  $MnO$ 'li granatın kararlılık alanını kontrol eder [4,6]. Ortamda akışkanın varlığı bu kararlılığı etkileyebilir. Çünkü, sıcaklık azaldıkça kloritoid-biyotit topluluğu giderek daha düşük oranda  $H_2O$ 'da ( $\sim 0.25$ ) kararlıdır [3]. Waters ve Lovegrove [3] tarafından yapılan bir çalışmada, Bushveld metamorfizmasının etkilediği metamorfik dilimlerdeki metapelitlerde, kloritoidin tüketilmesi ve staurolitin oluşumuna yol açan reaksiyonun yavaş staurolit çekirdeklenmesi ile ilksel kloritoid porfiroblastlarının kısmen düşük reaktivitesinin birleşimi sonucu olduğu ifade edilir. Bu durum, staurolit çekirdeklenmesinde gecikmeye sebep olur ki kritik parametre, Pattison ve Tinkham [7] tarafından tanımlandığı şekliyle çekirdeklenmenin enerji itici gücü olan reaksiyon afinitesi'dir. Reaksiyon afinitesi, özellikle az/hiç  $H_2O$ 'nun açığa çıkmadığı reaksiyonlarda düşüktür. Bu reaksiyonlarda önemli ölçüde ısı aşım beklenir [7]. Bu durum, denge öngörülerine kıyasla ürün porfiroblastlarının gecikmeli çekirdek oluşumuna ve reaktan fazların tüketilmesine sebep olur [7,9]. Bu çalışma, orta basınç Barroviyen zonu prograd metamorfizma izleri taşıyan Pütürge metamorfiti metapelitlerdeki kloritoid klorit fillitlerde granatla birlikte

bulunan kloritoidin mineral kimyasını SEM/EDS analizi ile yorumlamayı amaçlar.

## **2. YÖNTEM**

Mineral örneklerinin mikroyapısal ve kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, Selçuk Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Carl Zeiss EVO LS10 model SEM cihazı kullanılarak yapılmıştır. SEM analizlerinde örnekler karbon ile kaplanarak vakum ortamında incelenmiştir. Cihaz, düşük vakum modunda çalıştırılarak örneklerin yüzey morfolojisi yüksek çözünürlükte görüntülenmiştir.

Minerallerin kimyasal bileşimleri, aynı cihazda yan ekipman olarak bulunan Oxford Instruments EDS detektörü ile analiz edilmiştir. EDS analizleri 20 kV hızlandırıcı voltaj altında yapılmış, elementel dağılım haritaları ve noktasal analizlerle minerallerin ana ve iz element içerikleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler, örneklerin kristal kimyası ve metamorfik koşullar altında geçirdiği değişimlerin yorumlanmasında kullanılmıştır. Örneklerin element bileşimlerine yönelik yarı-kantitatif analizler ağırlık yüzdesi (wt.%), normalize edilmiş ağırlık yüzdesi ve atom yüzdesi (at.%) olarak raporlanır. Mineral kısaltmaları Whitney ve Evans (2010)[']dan alınmıştır.

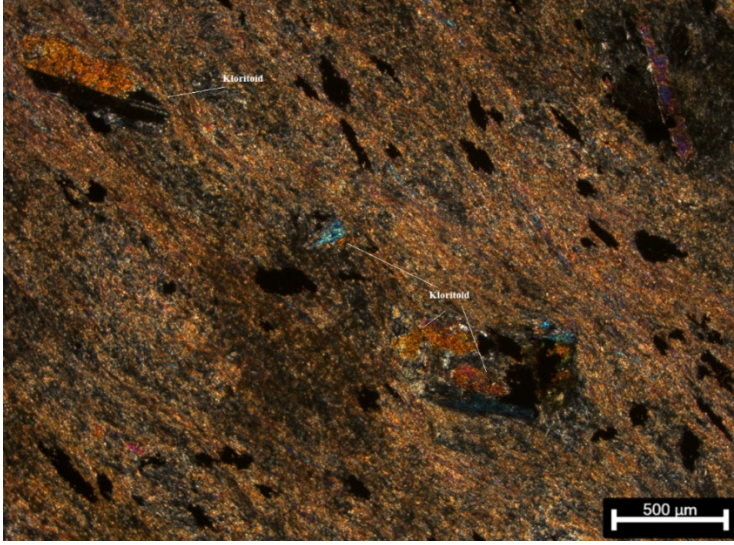
## **3. PETROGRAFİ VE MİNERAL KİMYASI**

Pütürge metamorfiti kloritoid içeren metapelitik kayalardaki kloritoidlerde element haritalama ve SEM analizlerini konu alan bu çalışmada genel formülü

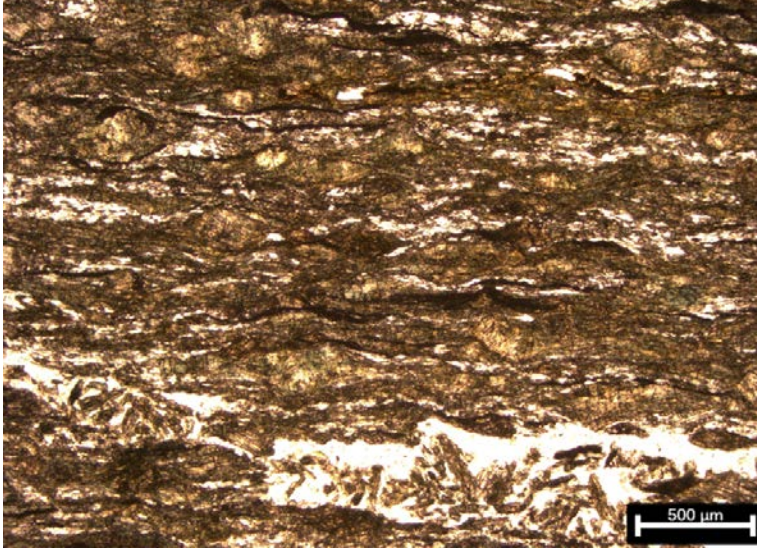
$(\text{Fe,Mg,Mn})_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$  olan kloritoid, bölgesel metamorfizma alanlarında görülür [8,10]. Kontak metamorfizma veya hidrotermal alanlarda da bulunabilen bir nezosilikat minerali olan kloritoid [11], Pütürge metamorfizminin hem şistlerinde hem fillitlerinde görülebilmektedir.

Barrow tipi metamorfizma izleri taşıyan Pütürge metamorfiti metapelitik kayaçları; Semipelit, psammit, metakonglomera, kuvarsit, kalsilikat içeren metakarbonatlar ve mermer ardalanmalı metakarbonatlar şeklinde bir içeriğe sahiptir. Kloritoid minerali içeren fillit/şist, düşük–orta sıcaklık ve düşük basınç koşullarında Barrow metamorfizmasının biyotit zonu ve staurolit–disten zonunda bulunabilir [11]. Genel olarak, alt yeşilşist fasiyesinden üst amfibolit fasiyesine kadar değişen geniş bir fiziki koşul spektrumu içerisinde metamorfizminin bölgesel metamorfizma ürünü kayaçlarıdır [12-14].

Bölgesel jeoloji [5,6,12-18], büyük tektonik yapılarla ilişkili olarak tüm kayaçlarda tektonize bir görünüme sebep olmuştur. Şistozite yapısı gösteren silikatlı bu kayaçlarda, granat, staurolit, disten ve kloritoid mükemmel foliasyon içinde porfiroblastlardır. Gri-gümüş renkli mikaşistlerde, muskovit, biyotit, kuvars, plajiyoklaz, granat, staurolit ve kloritoid minerallerinin bu özelliği belirgindir. Pütürge metamorfizmindeki metapelitleri, kuvars veya mika bakımından zengin kuvarsit metapelitleri ve (az plajiyoklaz içeren) veya mika bakımından zengin muskovit ve disten içeren kuvarsit olarak ayrılabilir. Deformasyon derecesi yüksek kayaçlarla (granatlı metapelit gibi) mermer arasında dereceli geçişler görülür. Metapelitlerde lifsi-iğnemsî tremolit (Şekil 1), kuvars damarları, disten içeren kuvarsitler ve sıvı kapanımların çizgisel uzanımı deformasyonu kanıtlar (Şekil 1).



**Şekil 1. Kloritoid-klorit fillitlerin polarizan mikroskop görüntüsü (Ç.Nx4)**



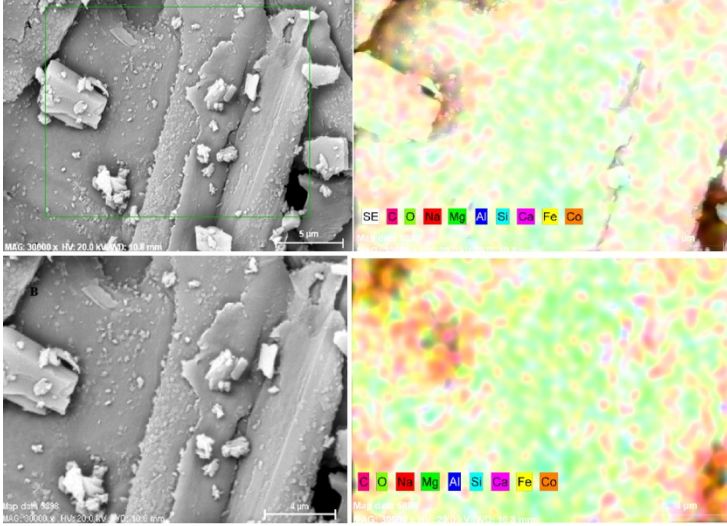
**Şekil 2. Granatlı kloritoid-klorit şistlerin polarizan mikroskop görüntüsü (T.Nx4)**

Tipik yelpaze kuyruğu morfolojisi, düşük klivaj, yeşilimsi kahverengi/mavimsi mor pleokroizması gösterir (Şekil 1). Genellikle tek kristal olarak bulunur. Foliasyonunu işaret eden yönlenmiş muskovit ve kloritler içerisinde kloritoid porfiroblastları dokusal bir ilişki sunar (Şekil 2). Kloritoid içeren şist/fillitler ani değişim gösteren ve güçlü biçimde tektonize olmuş bir bölgede, çıplak gözle dahi görülebilen kloritoid porfiroblastları kapsar. Kloritoid ve grafit içeren metapelitik şistlerde, sınırlı boyut aralığında tabular porfiroblastlar şeklinde kloritoidlerin izlendiği görülür (Şekil 1). Kloritoid klorit fillitlerde lepidoblastik doku belirgindir (Şekil 2). Granoblastik ve porfiroblastik dokuda metapelitlerin kuvars, plajiyoklaz, muskovit ve biyotit ana mineralleriyle birarada görülür (Şekil 1, Şekil 2). Bu durum tektonizmayla eş zamanlı büyümeyi işaret eder [12]. Kloritoid porfiroblastlarının klivajın üzerine büyüdüğü görülür (Şekil 2). Foliasyon, porfiroblastlar etrafında yeralır. Kloritoid porfiroblastları basınç gölgeleri ile çevrelenebilir. Böyle bir doku ise kloritoid porfiroblastlarının ana foliasyonunu oluşturan deformasyon olayından sonra oluştuğunu gösterir [19].

#### **4. SEM İNCELEMELERİ**

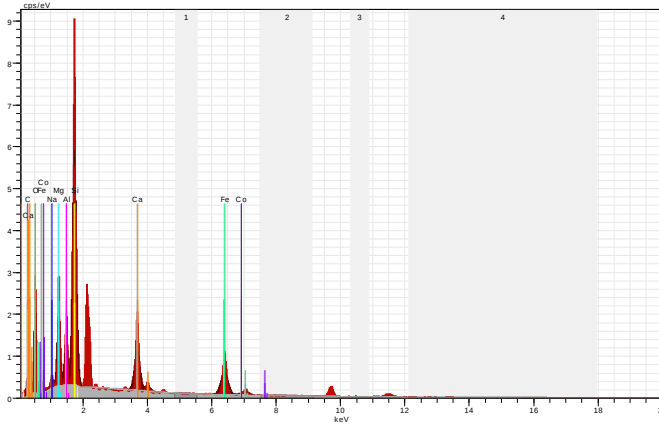
Kloritoid fillit/şistlerden seçilen iki örneğe SEM/EDS analizi uygulanmıştır. Bu analizler, mineral fazlarını oluşturan elementlerin türünü, görelî oranlarını ve mineral yapısını belirlemek amacıyla kullanılan yöntemlerden biridir. SEM/EDS analizleri Selçuk üniversitesi Merkez laboratuvarında yaptırılmıştır. Şekil 3'daki SEM görüntüsü, kloritoid ve ilişkili mineral fazlarını, dokusal ilişkileri ve farklı noktalarda yapılan yarı-nicel Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) analizlerini göstermektedir. Sol tarafta yer alan yüksek

çözünürlüklü görüntü ise, kloritoid porfiroblastlarını gösterir. Bu porfiroblastlar, kayaç klivajına göre rastgele dağılmıştır.



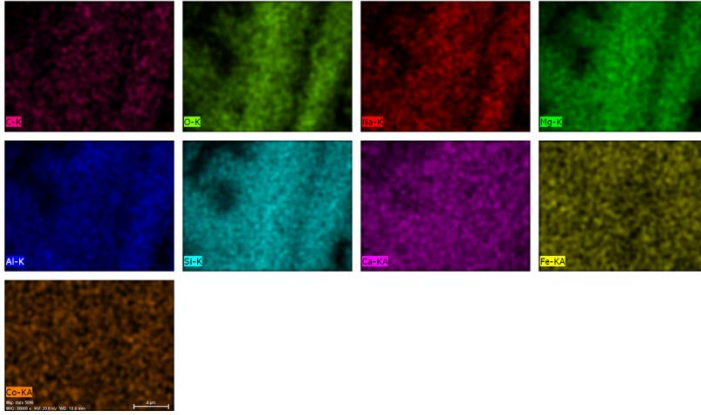
**Şekil 3. Kloritoid içeren şistlerdeki mineral fazların görüntüsünde işaretli yıldızlarda alınan SEM fotomikrografi ve element dağılımı. C elementinin görünümü, SEM analizinden önce örneğe uygulanan karbon kaplamasından kaynaklanmaktadır.**

Kloritoid porfiroblastlarının EDS analizi, bu mineral fazın ağırlıklı olarak Si, Al, O ve Fe içerdiğini göstermektedir (kütle oranları Si:Al:O:Fe = 11.42:2.56:32.77:7.08), ayrıca az miktarda Mg (4.39 wt%), Na(1.01 wt%), Ca(4.52 wt%), Co(0.34 wt%) ve C(4.11 wt%) vardır (Şekil 4).



**Şekil 4. Kloritoid içeren şistlerdeki mineral fazların EDS spektrumları.**

Hem kloritoid içinde hemde matriste bulunan kuvars EDS spektrumunda, sadece Si ve O elementlerinin varlığı ile kanıtlanmıştır. Az orandaki ilmenit ise kapanım minerali olarak bir tanede izlenmiştir. EDS spektrumları, literatür verileri ile uyumludur (<http://www.sfu.ca/~marshall/sem/mineral.htm>). Elektron ışınının örnek üzerinde taranmasıyla oluşan X-ışınları, EDS haritalama üretmek için kullanılırken, BSE görüntüsüne ek olarak bir mineral fazın element dağılımının anlamlı bir görseli alınmış olur. Şekil 3’de ve BSE görüntüsünde (Şekil 4) gösterilen farklı fazlar element haritalama ile tanımlanabilir (Şekil 4); Bu haritalama yalnızca elementlerin dağılımının nitel bir görüntüsüdür.



**Şekil 5. Kloritoid mineraline ait element haritası**

Nerone ve diğerleri [19], kloritoidin diğer metamorfik indeks minerallerle olan bağının net olmadığını ve Al'ca fakir/zengin düşük ve orta basınçlı metapelitlerde görülebildiğini ifade eder. Yüksek Mg içerikli kloritoidlerin ise yüksek basınç metapelitlerde görülebildiğini belirtir. Kloritoidin düşük dereceli kayaçlardaki varlığı Üst Devoniyen epizon şeyllerinde raporlanmıştır [20]. Spear [21], pirofillit+kloritoid paragenezinin varlığını belirtir. Diğer bir araştırmacı [22], Yeşilışt Fasiyesi'nde Fe'li ve Al'lu kayaçlarda kloritoid genellikle klorit ve muskovit ile birlikte yaygındır. Çalışma alanından alınan örneklerde bunu göstermektedir. Amfibolit fasiyesinde ise sadece andaluzit, disten ve staurolit ile birlikte bulunur [23]. Deformasyona uğramış amfibolit fasiyesin staurolit-disten zonunda kloritoid, muskovit, klorit ve kuvars'la birlikte bulunur. İncelenen kloritoid porfiroblastında deformasyon izleri oldukça azdır. Bu, deformasyon sonrası büyüme olarak yorumlanabilir. Ayrıca, Al bakımından fakir, ancak Fe açısından zengin metapelitlerin retrograd metamorfizmada duraylıdır [13,18]. Kloritoidin sınırlı yayılımı dikkate alındığında, bu mineralin oluşumu, deformasyon izleri göstermeyen felsik granitoid kütleleriyle ilişkili ısı akısından kaynaklanabilir [19].

Castellanos ve diğerleri [24] kloritoid içeren mineral topluluklarını, hem birçok bölgesel metamorfizma alanında hem de nadir olarak kontak aureollerinde görülüyor olması, kloritoid oluşumunun düşük basınç ve dar bir sıcaklık aralığında gerçekleştiğini gösterir [25]. Bu özellikteki kloritoid, belirli bir toplam kayaç bileşimine sahiptir [26].

İnceleme alanında kontak metamorfizmanın varlığını işaret eden herhangi bir jeolojik veri bulunmadığından, kloritoid içeren mineral topluluklarının kökeni, kısmen deformasyona uğramış küçük granitoid kütlelerinin yerleşimiyle ilişkili ısı akılarına bağlı bölgesel metamorfizma olduğu söylenebilir. Zira Ríos ve arkadaşları [27], metakarbonatlarda prograd CO<sub>2</sub> kaybının, çevredeki metapelitik kayaçların bölgesel dehidratasyonu sonucu açığa çıkan H<sub>2</sub>O ile gerçekleştiğini belirtir. Ancak scapolitin varlığı ya da yokluğuna bağlı olarak H<sub>2</sub>O açısından zengin diyopsit reaksiyon zonunun gelişimi, son metamorfizma evresinde yerleşmiş ve metamorfizmayla eş zamanlı olarak ortognayslardan kaynaklanan akışkanların etkisiyle de oluşabildiğini gösteren çalışmalar vardır [12,18,27]. Kloritoid bileşiminde potasyumun varlığı, staurolit-disten zonunda yaygın olarak gözlemlenen alüminyumlu minerallerin serisit alterasyonunu ve retrograd metamorfizma sırasında potasyumca zengin akışkanların varlığını gösterir[27].

## **5. SONUÇ**

Metapelitlerin prograd metamorfizma sırasında yaygın olarak varsayılan H<sub>2</sub>O ile doymuş koşulların aksine, hafif H<sub>2</sub>O doyumsuzluk koşullarına ulaşabileceğini göstermektedir. Denge termodinamiği çerçevesinde, bu H<sub>2</sub>O doyumsuzluğu kloritoid ve biyotitin gözlenen birlikteliğini açıklar. Pütürge metamorfiti kloritoid fillit/şistlerinde izlenen dokusal

görünüm, iri kloritoid porfiroblastları düşük sıcaklık orta basınç Barrovien zonunda deformasyon öncesi gelişmiş olduğunu işaret eder.

## **KAYNAKÇA**

1. White, R. W., Powell, R., Holland, T. J. B., Johnson, T. E., & Green, E. C. R. (2014). New mineral activity–composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(3), 261–286.
2. Bushmin, S. A., & Glebovitsky, V. A. (2008). Scheme of mineral facies of metamorphic rocks. *Geology of Ore Deposits*, 50(8), 659–669.
3. Waters, D. J., & Lovegrove, D. P. (2002). Assessing the extent of disequilibrium and overstepping of prograde metamorphic reactions in metapelites from the Bushveld Complex aureole, South Africa. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(2), 135–149. <https://doi.org/10.1046/j.0263-4929.2001.00350.x>
4. Saki, A., Miri, M., & Oberhänsli, R. (2021). Pseudosection modelling of the Precambrian meta-pelites from the Poshtuk area, NW Iran. *Periodico di Mineralogia*, 90, 325–340. <https://doi.org/10.13133/2239-1002/16632>
5. White, R. W., Powell, R., & Johnson, T. E. (2014). The effect of Mn on mineral stability in meta-pelites revisited: New a–x relations for manganese-bearing minerals. *Journal of Metamorphic Geology*, 32, 809–828. <https://doi.org/10.1111/jmg.12095>
6. Sengupta, N. (2012). Stability of chloritoid + biotite-bearing assemblages in some meta-pelites from the Palaeoproterozoic Singhbhum Shear Zone, eastern India and their implications. *Geological Society, London, Special Publications*, 365, 91–116. <https://doi.org/10.1144/SP365.6>

7. Pattison, D. R. M., & Tinkham, D. K. (2009). Interplay between equilibrium and kinetics in prograde metamorphism of pelites: An example from the Nelson aureole, British Columbia. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(3), 249–279. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00816.x>
8. Fyfe, W. S., Price, N. J., & Thompson, A. B. (1978). Fluids in the Earth's crust: Their significance in metamorphic, tectonic, and chemical transport processes. Elsevier Scientific Pub.
9. Goscombe, B., Gray, D., & Hand, M. (2006). Crustal architecture of the Himalayan metamorphic front in eastern Nepal. *Gondwana Research*, 10(3), 232–255. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.05.003>
10. Okuyama-Kusunose, Y. (1994). Phase relations in andalusite–sillimanite type Fe-rich aluminous metapelites: Tono contact metamorphic aureole, northeast Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, 12(2), 153–168. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1994.tb00011.x>
11. Erdem, E. (1994). Pütürge (Malatya) metamorfitlelerinin petrografik ve petrolojik özellikleri [Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Elazığ.
12. Kılıç, A. D., & Kaya, H. (2015). Pütürge metamorfitletindeki zonlu granatların incelenmesi (Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi MF 12.42). 1–105.
13. Kılıç, A. D., & Ateş, C. (2015). Geochronology of the Late Cretaceous magmatism and metamorphism, Pütürge Massif, Turkey. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5).

14. Şahin, Ö., & Işık, V. (2010). Çelikhan (Adıyaman) civarında yüzeyleyen metamorfik ve magmatik kayaların petrojisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 53(2–3), 129–158.
15. Tolun, N. (1954). Güneydoğu Anadolu'nun stratigrafisi ve tektoniği (MTA Rapor No: 2147).
16. Perinçek, D., Günay, Y., & Kozlu, H. (1987). Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesindeki yanal atımlı faylar ile ilgili yeni gözlemler. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği, Türkiye 7. Petrol Kongresi Bildiriler Kitabı*, 89–103. Ankara.
17. Özkan, M. K., Beyazpirinç, M., Çoban, M., Usta, D., Candan, O., Yusufoglu, H., Ergen, A., Bozkurt, A., & Tuncay, E. (2022, November 28–30). Pütürge Metamorfitlerinin Triyas öncesi bölümünün stratigrafik özellikleri ve Toros Kuşağı ile korelasyonu (GD Anadolu, Türkiye). In *I. Toros Jeolojisi Sempozyumu / 2nd Symposium on Geology of the Taurus Belt* (pp. xx–xx). Mersin, Turkey.
18. Sara, N., Chiara, G., & Franco, R. (2023). Equilibrium and kinetic approaches to understand the occurrence of the uncommon chloritoid + biotite assemblage. *European Journal of Mineralogy*, 35(3), 305–320. <https://doi.org/10.5194/ejm-35-305-2023>
19. Elena, N., Gavril, S., & Hans-Joachim, M. (2009). Chloritoid-bearing mineral assemblages in high-pressure metapelites from the Bughea Complex, Leaota Massif (South Carpathians). *Journal of Petrology*, 50(1), 103–125.
20. Spear, F. S. (1982). Phase equilibria of amphibolites from the Post Pond Volcanics, Mt. Cube Quadrangle,

- Vermont. *Journal of Petrology*, 23(3), 383–426.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/23.3.383>
21. Kohn, M. J., & Spear, F. S. (1993). Phase equilibria of margarite-bearing schists and chloritoid + hornblende rocks from western New Hampshire, U.S.A. *Journal of Petrology*, 34(3), 631–651.
  22. Menard, T., & Spear, F. S. (1994). Metamorphic P–T paths from calcic pelitic schists from the Strafford Dome, Vermont, USA. *Journal of Metamorphic Geology*, 12(6), 811–826.  
<https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1994.tb00061.x>
  23. Castellanos-Alarcón, O. M., Ríos-Reyes, C. A., & García-Ramírez, C. A. (2016). Occurrence of chloritoid-bearing metapelitic rocks and their petrological significance in the Silgará Formation, Santander Massif, Colombian Andes. *Redalyc*.  
<https://www.redalyc.org/pdf/505/50546851006.pdf>
  24. Ganguly, J. (1969). Chloritoid: Stability and electron probe microanalysis. *American Mineralogist*, 54(5–6), 859–874.
  25. Wang, P., & Spear, F. S. (1991). A field and theoretical analysis of garnet + chlorite + chloritoid + biotite assemblages from the Tri-State (MA, CT, NY) area, USA. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106(2), 217–235.
  26. Ríos, C. A., Castellanos, O. M., Gómez, S. I., & Ávila, G. A. (2008). Petrogenesis of the metacarbonate and related rocks of the Silgará Formation, Central Santander Massif, Colombian Andes: An overview of a “reaction calcic exoscarn”. *Universidad Nacional de Colombia*.

27. Ríos, C. A., Castellanos, O. M., Gómez, S. I., & Ávila, G. A. (2008b). Petrogenesis of the metacarbonate and related rocks of the Silgará Formation, Central Santander Massif, Colombian Andes: An overview of a “reaction calcic exoscarn”. Universidad Nacional de Colombia.

# SİSMOLOJİDE MAKİNE ÖĞRENİMİ UYGULAMALARI

**Timur TEZEL<sup>1</sup>**

## 1. GİRİŞ

Makine Öğrenimi (ML) yöntemleri, büyük hacimli sismik verilerden gömülü ilişkileri öğrenerek anlama ve tahmin yeteneklerini geliştiren bir yaklaşımlar koleksiyonudur (Mousavi ve Beroza, 2023). ML ve Derin Öğrenme (DL), sismolojide deprem kataloğu geliştirme, sismik verilerin gürültüden arındırılması ve tehlike değerlendirmesi gibi temel görevlerde baskın yaklaşımlar haline gelmektedir (Mousavi ve Beroza, 2023). ML tabanlı yöntemler, geleneksel yöntemlere kıyasla algılanan olay sayısında on katına kadar artışa ve buna bağlı olarak tamlik büyüklüğünde ( $M_c$ ) önemli bir azalmaya yol açarak veri analiz kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır (Mousavi ve Beroza, 2023; Tan vd., 2021). Bu artış, geleneksel şablon eşleştirme tekniklerinin sağladığı  $M_c$  azalmasına benzer bir etki yaratmıştır (Mousavi ve Beroza, 2023).

Bu makale, ML'nin sismolojideki uygulamalarını, özellikle faydalarını ve zorluklarını karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Kritik olarak, tahmin yeteneklerini ve fiziksel tutarlılığı artırmak için fizik tabanlı yasaları (Kısmi Diferansiyel Denklemler, PDE'ler) öğrenme algoritmasına dahil eden Fizik Bilgili Sinir Ağları (PINNs) gibi yaklaşımların önemini vurgulamaktadır (Ding vd., 2024; Nierula, 2023). Aynı zamanda, deprem kataloğunun tamlığını karakterize eden tamlik

---

<sup>1</sup> Doç. Dr., Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-9927-6557.

büyükliğünün (Mc) tahmin yöntemlerinin karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Sismisite parametrelerinin doğru tahminlerini elde etmek için Mc varyasyonlarının uzayda ve zamanda dikkate alınması zorunludur (Pavlenko ve Zavyalov, 2022; Wang vd., 2025). Sonuçlar, ML'nin operasyonel sismolojideki merkezi rolünü sağlamlaştırmak için açık kıyaslama (Münchmeyer vd., 2022) ve kalite kontrol boru hatlarının geliştirilmesinin stratejik önemini göstermektedir (Noel ve West, 2025).

Sismoloji, doğal bilimler alanında karmaşık ve büyük hacimli verilerin işlenmesini gerektiren temel bir disiplindir (Mousavi ve Beroza, 2023). Geleneksel sismolojik yöntemlerin sınırlamaları, araştırmacıları veri işleme yeteneklerini önemli ölçüde geliştirmeye itmiştir. Bu bağlamda, makine öğrenimi (ML) ve özellikle derin öğrenme (DL) teknikleri, sismik sinyal işleme yeteneğini artırmıştır. DL, karmaşık ilişkileri otomatik olarak keşfetme yeteneğine sahip olduğu için, doğrudan ham verilerle beslenebilir (Goodfellow vd., 2016; Nierula, 2023). Sismik katalogların kalitesini belirleyen hayati bir parametre, tamlık büyüklüğü (Mc) olarak adlandırılır; bu, olayların %100'ünün güvenilir bir şekilde tespit edildiği en düşük büyüklüktür (Mignan ve Woessner, 2012; Pavlenko ve Zavyalov, 2022). Mctahmini, herhangi bir sismisite analizi için zorunlu ve kritik bir adımdır (Mignan ve Woessner, 2012; Wang vd., 2025). Mc için çok yüksek bir değer, kullanılabilir verilerin atılmasına (eksik örnekleme), çok düşük bir değer ise eksik verilerin kullanılmasına (önyargılı analiz) yol açar (Mignan ve Woessner, 2012). Mc değeri, Frekans-Büyüklik Dağılımının (FMD) doğrusal segmentinin başlangıcına karşılık geldiğinden, Gutenberg-Richter (GR) parametrelerinin yeterli tahminlerinin elde edilmesi için kritik öneme sahiptir (Pavlenko ve Zavyalov, 2022). Bu nedenle, sismisite parametrelerinin doğru tahminlerini elde etmek için Mcvaryasyonlarını uzayda ve zamanda hesaba

katmak zorunludur (Pavlenko ve Zavyalov, 2022). Bu makale, sismolojide ML kullanımının mevcut durumunu ve özellikle Mctahmini ve zemin hareketi modellemesi alanlarındaki yenilikleri inceleyerek, bu teknolojinin bilimsel ve operasyonel faydalarını değerlendirmektedir.

## 2. METHOD

Sismolojide ML uygulamaları, sismik olay kataloğu geliştirme, tehlike değerlendirmesi ve veri işleme olmak üzere geniş bir yelpazede yer almaktadır. ML/DL teknikleri, sismik verilerin karmaşık yapısını ele almak için özel olarak tasarlanmış çeşitli ağ mimarilerini kullanır (Mousavi ve Beroza, 2023).

### 2.1. Popüler DL Mimarileri

**Evrişimli Sinir Ağları (CNN):** CNN'ler, sismik veri interpolasyonu (Wang vd., 2019), fay tespiti (Araya-Polo vd., 2017) ve litofasi sınıflandırması (Alaudah vd., 2019) gibi görevlerde en yaygın kullanılan modellerdendir.

**Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM):** Bunlar, zamansal dizileri (örneğin, deprem büyüklüğü tahmini) işlemek için etkilidir (Dikmen, 2024; Fabregas vd., 2020).

**Transformer ve Dikkat Mekanizmaları (Attention): EQTransformer,** dikkat mekanizmasını içeren derin öğrenme modelidir ve eş zamanlı deprem tespiti ve faz seçimi için geliştirilmiştir (Mousavi vd., 2020). EQTransformer, küresel veri kümesi üzerinde P-fazı için 0.00 s'lik ortalama hata ve 0.03 s'lik standart sapma ile ve S-fazı için 0.00 s'lik ortalama hata ve 0.11 s'lik standart sapma ile en iyi performansı göstermiştir (Mousavi vd., 2020). Transformer ağı, PcP ve PKiKP gibi telesismik fazların tespiti ve seçimi için de uygulanmaktadır (Yuan ve Zhang, 2019). Seismo-

Performer modeli ise, hızlı ve genel faz tanıma sağlamak için spektrogramlar ve transformatör mimarisi kullanır (Stepnov ve Chernykh, 2021).

**Üretken Çekişmeli Ağlar (GAN):** Bu ağlar, gürültü azaltma (denoising) ve hız modeli oluşturma (VMB) gibi uygulamalarda kullanılır (Min vd., 2021; Zhang vd., 2019). **DDAE-GAN** yöntemi, derin gürültü azaltıcı (DDAE) ve GAN çerçevesini entegre ederek sismik verilerdeki gürültüyü başarılı bir şekilde baskılayabilir (Min vd., 2021). GAN, sentetik veriler kullanarak çok sayıda eşleştirilmiş temiz-gürültülü veri seti üretebilir, bu da DDAE'nin ön eğitiminde kullanılır (Min vd., 2021).

**Fizik Bilgili Sinir Ağları (PINNs):** PINN'ler, derin sinir ağları tarafından yaklaşıtırlan bilinmeyen potansiyel çözümü *türetmek öğrenme sürecini bilinen fizik yasalarıyla (PDE'ler) kısıtlar (Ding vd., 2024). Bu modeller, veri kaybının yanı sıra, ağ çıktısının yönetici PDE'lere ikame edilmesiyle elde edilen hatayı ölçen bir Fizik Kaybı* terimi içerir (Ding vd., 2024; Mousavi ve Beroza, 2023). PINNs yaklaşımı, etiketli veriye olan bağımlılığı azaltarak genelleştirme yeteneklerini artırır ve eksik etiketli veri setlerinin varlığında ters problemleri çözmeye olanak tanır (Mousavi ve Beroza, 2023). Fourier Özellikli PINNs (FF-PINNs) yöntemi, karmaşık hız modelleri (keskin arayüzler içeren) için yüksek frekanslı bilgileri öğrenme yeteneğini önemli ölçüde artırarak, tam bağlantılı sinir ağlarına göre yaklaşık bir büyüklük sırası kadar daha iyi tahmin doğruluğu sağlar (Ding vd., 2024).

## **2.2. Katalog Geliştirme ve Faz Seçimi**

ML algoritmaları, sismik olay tespiti, faz varış zamanlarının seçimi ve olay konumlandırması süreçlerini otomatikleştirerek yeni, yüksek çözünürlüklü kataloglar

oluşturulmasına olanak tanımıştır (Mousavi vd., 2020; Jiang vd., 2022).

**Örnekler ve Başarı:** EQTransformer gibi DL modelleri, P- ve S-fazı varış zamanlarının seçiminde yüksek doğruluk göstermiştir (Mousavi vd., 2020). Bu tür otomatik işlem süreçleri, Endonezya'nın karmaşık tektonik bölgelerinde beş yıllık sürekli sismik veriden ~19.000 olay içeren yeni hiposantr katalogları oluşturmak için kullanılmıştır (Jiang vd., 2022). Ayrıca, Antarktika'da ML teknikleri kullanılarak 21 yıllık sismik veriden 60.006 olay içeren bir katalog oluşturulmuştur (Peña Castro vd., 2024).

**Zorluklar ve Kalite Kontrol:** ML algoritmaları, algılanan olay sayısını büyük ölçüde artırsa da, bölgesel izleme kuruluşları için aktarılabilirlikleri karmaşıklıklar doğurur (Noel ve West, 2025). Bu karmaşıklıklar, kötü kısıtlanmış, küçük büyüklüklü olayların eklenmesi ve deprem olmayan sinyallerin yanlış tanımlanması gibi sahte pozitiflerin varlığını içerir (Noel ve West, 2025). Bu tutarsızlıklar, güvenilir ML performansı için konuma dayalı eğitim veri setlerinin oluşturulmasının gerekliliğini düşündürmektedir (Noel ve West, 2025). Kalite kontrol (QC) yöntemleri, otomatik olarak elde edilen hiposantrlardan sahte pozitifleri elemek için kullanılabilir; örneğin, topluluk öğrenme kullanılarak JMA'dan elde edilen hiposantrlardan sahte pozitifler uzaklaştırılmıştır (Tamaribuchi vd., 2021, 2023'ten alıntılanmıştır, (Shibutani vd., 2024)).

### **2.3. Sismik Veri Kalitesi: Tamlık Büyüklüğü (Mc) Tahmini**

Mc'nin uzayda ve zamanda doğru bir şekilde tahmin edilmesi, sismolojik analizler için hayati ve zorunlu bir adımdır (Mignan ve Woessner, 2012; Pavlenko ve Zavyalov, 2022). Mc tahmini için uygulanan yöntemlerin karşılaştırmalı analizi, yöntem seçiminin önemi ve zorluklarını göstermektedir

(Pavlenko ve Zavyalov, 2022; Wang vd., 2025; Lombardi vd., 2025).

**Geleneksel Mc Tahmin Yöntemleri:** Kaynaklar, MAXC, GFT, MBS, MBASS, EMR ve LLS olmak üzere altı modern yöntemi karşılaştırmaktadır (Pavlenko ve Zavyalov, 2022).

**MAXC (MAXimum Curvature):** Kümülatif FMD'nin maksimum eğriliği noktasındaki tahmindir (Pavlenko ve Zavyalov, 2022). Bu, en basit ve en hızlı prosedür olmasına rağmen, özellikle artımlı FMD'nin belirgin bir maksimuma sahip olmadığı durumlarda Mc'yi düşük tahmin etme eğilimindedir (Pavlenko ve Zavyalov, 2022).

**MBS (Magnitude of b-value Stability):** b-değerinin kararlılığına dayanır (Woessner ve Wiemer, 2005; Pavlenko ve Zavyalov, 2022). MBS-WW (Woessner ve Wiemer, 2005) yöntemi, özellikle homojen Mc veri setleri için en iyi genel performansı göstermiştir ve katalogun tamamlanmış kısmında sadece 300 olay gibi minimum bir gereksinimle güvenilir tahminler sağlayabilir (Wang vd., 2025).

**EMR (Entire Magnitude Range):** Olayların eksik rapor edilen büyüklüklere ait katalog kısmını normal dağılımla tanımlayan birleştirilmiş bir model önerir (Woessner ve Wiemer, 2005; Pavlenko ve Zavyalov, 2022). Bu yaklaşım, sismisitenin en kapsamlı tanımını sağlar ancak hesaplama süresi açısından daha fazla zaman tüketir (Pavlenko ve Zavyalov, 2022).

**Olasılıksal ML Yöntemleri:** BSReLU ve AEReLU gibi yeni yöntemler, keskin kesme tabanlı modellerin (step-function-based) sınırlamalarını aşmak için, tespit olasılığının sıfırdan bire kademeli geçişini modelleyen olasılıksal bir çerçeve benimser (Wang vd., 2025). Özellikle AEReLU, simüle edilmiş verilerde ve altı ampirik katalog üzerinde en doğru ve sağlam Mctahminlerini sağlamıştır (Wang vd., 2025).

**ML'de Mc'nin Önemi:** Mc filtresi, deprem frekans tahmini için geliştirilen **Ens-ConvNARX** çerçevesinin başarısında kritik bir rol oynamıştır; Ens-ConvNARX modelinden bu filtrenin kaldırılması, bir ay önceden tahmin doğruluğunu 50 puan azaltmıştır (Nugroho vd., n.d.).

#### **2.4. Zemin Hareketi Modelleme ve Tehlike Değerlendirmesi**

ML, sismik tehlike değerlendirme için kritik parametrelerin tahmin edilmesinde de kullanılmaktadır (Mori vd., 2022).

**Zemin Hareketi Modelleri (GMMs):** Ensemble (topluluk) yöntemleri, En Büyük Zemin İvmesi (PGA) gibi önemli zemin hareket parametrelerini tahmin etmek için büyük ölçekli regresyon problemlerinde kullanılır (Dolatyabi, 2025; Dikmen, 2024). Giriş değişkenleri genellikle moment büyüklüğü ( $M_w$ ), hiposantr uzaklığı ( $R$ ), fayın üst kısmının derinliği ve ilk 30 m'deki ortalama kayma dalgası hızı ( $V_{s30}$ ) içerir (Mori vd., 2022).

**ShakeMap Haritalama:** ML yaklaşımları, sismik mikrozonlama verilerini kullanarak zemin hareketi tahmin haritaları oluşturmada geleneksel GMPE (Ground Motion Prediction Equations) tabanlı yaklaşımlara göre daha iyi performans göstermiştir (Mori vd., 2022). ML yaklaşımı, doğruluğu (ortalama değer) ve hassasiyeti (standart sapma) açısından en iyi performansı sağlamak ve standart sapma değerlerini %45–60 oranında azaltmaktadır (Mori vd., 2022).

#### **2.5. Sismik Veri İşleme (Gürültü Azaltma ve Hız Tahmini)**

ML, sismik keşif ve sismolojik çalışmalarda veri kalitesini artırmak için önemlidir (Anikiev vd., 2023).

**Gürültü Azaltma:** Derin Gürültü Azaltıcı (DDAE) ve GAN'ı (DDAE-GAN) entegre eden yöntemler, gürültüden arındırma (denoising) için yenilikçi bir yaklaşım sunar; bu, özellikle zayıf mikrosismik sinyallerin baskın olduğu alanlarda önemlidir (Min vd., 2021; Anikiev vd., 2023).

**Hız Profili Tahmini:** ML modelleri, sismik P-dalgası (Vp) ve S-dalgası (Vs) hız profillerini tahmin etmek için derinlik bilgisi, zemin/kayaç tipi, koordinatlar ve jeoloji gibi değişkenleri kullanır (Dumke ve Berndt, 2019; Kim vd., 2023). Örneğin, Japonya'daki K-NET ve KiK-net siteleri için Vp ve Vs profillerini tahmin etmek üzere 996 K-NET ve 677 KiK-net sitesinden alınan veriler kullanılmıştır (Kim vd., 2023).

### 3. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Makine öğreniminin sismolojiye entegrasyonu, operasyonel yetenekleri önemli ölçüde dönüştürmüştür.

#### 3.1. Başarımların Değerlendirilmesi

ML yöntemlerinin en belirgin başarısı, deprem kataloğu tamlığını iyi bir şekilde iyileştirmesidir; ML tabanlı yöntemler, geleneksel yaklaşımlara kıyasla tespit edilen olay sayısını on kat artırma potansiyeline sahiptir (Mousavi ve Beroza, 2023). Bu, özellikle mikrosismisite ve artçı şok dizileri gibi küçük olayların analizinde kritik öneme sahip olan  $M_c$  değerini düşürmektedir (Mousavi vd., 2020).

ML'nin tehlike değerlendirmesi alanındaki üstünlüğü, zemin hareketi modellemesinde de kanıtlanmıştır. Geleneksel GMPE'lere kıyasla, ML yaklaşımları daha yüksek doğruluk ve %45–60 oranında daha düşük standart sapma (daha yüksek hassasiyet) sunmuştur (Mori vd., 2022). En önemlisi, ML modelleri, sismik tehlike haritalaması için karmaşık yerel alan etkilerini (örneğin vadi ve topografik yükseltme etkileri)

geleneksel modellerden daha başarılı bir şekilde yakalayabilmiştir (Mori vd., 2022).

ML, sismik dalga formlarının işlenmesinde de devrim yaratmıştır. Dikkat mekanizmalı transformer ağları (EQTransformer), faz seçiminde son teknoloji performansını yakalamış ve hatta onu aşmıştır (Mousavi vd., 2020).

### **3.2. Zorluklar ve Gelecek Stratejileri**

ML uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte, operasyonel güvenilirliği etkileyen kritik zorluklar ortaya çıkmıştır:

1. **Veri Kalitesi ve Güvenilirlik:** ML katalogları daha fazla olay tespit etse de, bu kataloglar aynı zamanda kötü kısıtlanmış küçük büyüklüklü olayların ve deprem olmayan sinyallerin yanlış tanımlanması gibi sahte pozitifler içerir (Noel ve West, 2025). Bu durum, sonuçların bilimsel faydasını en üst düzeye çıkarmak için ikincil kalite kontrol (QC) ve filtreleme yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

2. **Genelleştirme ve Transfer Edilebilirlik:** ML modelleri bir bölgede veya sentetik veri setinde eğitildiğinde, farklı jeolojik veya gürültü ortamlarına aktarılması (genelleştirilmesi) zor olabilir (Anikiev vd., 2023). Sentetik ve gerçek veriler arasındaki dağılım uyumsuzluğu (domain mismatch), modelin gerçek dünyada kötü performans göstermesine neden olabilir. Bu sorunu çözmek için alan adaptasyonu (domain adaptation) prensiplerinin kullanılması stratejik bir yol sunmaktadır (Anikiev vd., 2023; Alkhalifah vd., 2022).

3. **Standartlaşma ve Kıyaslama:** ML tabanlı sismik sinyal algılayıcılarının ve toplayıcılarının performans iddialarının objektif olarak doğrulanması için birleşik API standartlarına (örneğin, SeisBench) uyulması ve sistematik, açık

kaynaklı kıyaslama yapılması zorunludur (Münchmeyer vd., 2022; Münchmeyer vd., 2022; Münchmeyer vd., 2022).

### **3.3 Gelecek Perspektifleri: Fizik Bilgili Öğrenme**

Gelecekteki araştırma ve geliştirmelerin en önemli odak noktası, Fizik Bilgili Sinir Ağları (PINNs) olacaktır (Ding vd., 2024). PINNs, öğrenme algoritmasını bilinen fizik yasalarına (PDE'ler) saygı duymaya zorlayarak, seyrek etiketli verilerle çalışırken bile modellerin güvenilirliğini ve fiziksel tutarlılığını garanti eder (Ding vd., 2024; Mousavi ve Beroza, 2023). Örneğin, FF-PINNs (Fourier Özellikli PINNs), karmaşık hız modellerinde bile dalga alanı simülasyonlarında yüksek doğruluk sağlayarak, sismik ters çözüm problemlerinde daha sağlam çözümler sunma potansiyeli taşımaktadır (Ding vd., 2024).

Özetle, Makine Öğrenimi, sismolojide hız ve ölçek açısından başarılı uygulamalara sahip olması yanı sıra operasyonel alanda güvenilirliği sağlamak için veri kalitesi, genelleştirme yeteneği ve fiziksel kısıtlamaların entegrasyonu konularına stratejik olarak odaklanılması gerekmektedir.

## KAYNAKÇA

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Autom. Control*, 19(6), 716–723.
- Alaudah, Y., Michałowicz, P., Alfarraj, M., & AlRegib, G. (2019). A machine-learning benchmark for facies classification. *Interpretation*, 7(3), SE175–SE187.
- Alkhalifah, T., Wang, H., & Ovcharenko, O. (2022). MLReal: Bridging the gap between training on synthetic data and real data applications in machine learning. *Artificial Intelligence in Geosciences*, 3, 101–114.
- Amorèse, D. (2007). Applying a change-point detection method on frequency-magnitude distributions. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 97(5), 1742–1749.
- Anikiev, D., Birnie, C., Waheed, U. B., Alkhalifah, T., Gu, C., Verschuur, D. J., & Eisner, L. (2023). Machine learning in microseismic monitoring. *Earth-Science Reviews*, 239, Article 104371.
- Araya-Polo, M., Dahlke, T., Frogner, C., Zhang, C., Poggio, T., & Hohl, D. (2017). Automated fault detection without seismic processing. *The Leading Edge*, 36, 208–214.
- Bindi, D., Pacor, F., Luzi, L., Puglia, R., Massa, M., Ameri, G., & Paolucci, R. (2011). Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bull. Earthq. Eng.*, 9, 1899–1920.
- Chen, K. P., Tsai, Y. B., Amorèse, D., & Chang, W. Y. (2011). Incorporating change-point detection updates of frequency-magnitude distributions within the Taiwan earthquake catalog. *Terr., Atmos. Oceanic Sci.*, 22(3), 261–269.

- Dikmen, O. (2024). Comparative analysis of machine learning models for earthquake prediction: A case study of Düzce, Türkiye. *International Journal of Innovative Research and Engineering Management*, 11(5), 73–82.
- Ding, Y., Chen, S., Miyake, H., & Li, X. (2024). *Physics-informed Neural Networks with Fourier Features for Seismic Wavefield Simulation in Time-Domain Nonsmooth Complex Media*. arXiv preprint.
- Dolatyabi, P. (2025). Ensemble machine learning models for predictive analysis: Application to seismic ground motion data. *World Journal of Advanced Research and Reviews*.
- Dumke, I., & Berndt, C. (2019). Prediction of seismic P-wave velocity using machine learning. *Solid Earth*, 10, 1989–2000.
- Fabregas, A. C., Arellano, P. B. V., & Pinili, A. N. D. (2020). Long-short term memory (LSTM) networks with time series and spatio-temporal approaches applied in forecasting earthquakes in the philippines. In *Proceedings of the 4th International Conference on Natural Language Processing and Information Retrieval*. ACM, 188–193.
- García-Hernández, R., D’Auria, L., Barrancos, J., & Padilla, G.D. (2019). On the functional expression of frequency-magnitude distributions: a comprehensive statistical examination. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 109(1), 482–486.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Jiang, C., Zhang, P., White, M., & Miller, M. S. (2022). A new catalog of seismicity in Timor–Leste and Eastern Indonesia derived from a temporary seismic deployment using machine learning. *Seismological Research Letters*, 93(4), 2110–2123.

- Kim, B., Shin, Y. C., Park, D. K., & Han, J. Y. (2023). Machine-learning models to predict P- and S-wave velocity profiles for Japan as an example. *Frontiers in Earth Science*, 11.
- Lombardi, A., Faenza, L., Lucente, F. P., & Vannucci, G. (2025). The inter-method differences are on average equal to 0.4 and 0.3, for  $M_c$  and  $b$ , respectively, but reach much larger values, especially during more intense seismic activity. *Geophys J Int*, 232(1), 1–17.
- Mignan, A. (2012). Functional shape of the earthquake frequency-magnitude distribution and completeness magnitude. *J. Geophys. Res.*, 117, B08302.
- Mignan, A., & Woessner, J. (2012). Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. *Community Online Resour. Stat. Seism. Anal.*
- Mignan, A., Werner, M. J., Wiemer, S., Chen, C. C., & Wu, Y. M. (2011). Bayesian estimation of the spatially varying completeness magnitude of earthquake catalogs. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(3), 1371–1385.
- Min, F., Wang, L. R., Pan, S. L., & Song, G. J. (2021). DDAE-GAN: Seismic Data Denoising by Integrating Autoencoder and Generative Adversarial Network. In *Rough Sets* (pp. 44–56). Springer.
- Mori, F., Mendicelli, A., Falcone, G., Acunzo, G., Spacagna, R. L., Naso, G., & Moscatelli, M. (2022). Ground motion prediction maps using seismic-microzonation data and machine learning. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 947–966.
- Mousavi, S. M., & Beroza, G. C. (2023). Machine learning in earthquake seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 51, 105–129.

- Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., Zhu, W., & Beroza, G. C. (2020). Earthquake transformer—an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. *Nat. Commun.*, 11(1), 3952.
- Münchmeyer, J., Woollam, J., Rietbrock, A., Tilmann, F., Lange, D., Bornstein, T., et al. (2022). Which picker fits my data? A quantitative evaluation of deep learning based seismic pickers. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(1), e2021JB023499.
- Nierula, K. (2023). *Physikalisch informiertes Deep Learning für wellenbasierte seismische Bildgebung* (Master's thesis). Technical University of Munich.
- Noel, S. K., & West, M. E. (2025). Challenges and opportunities of machine learning earthquake detection for regional monitoring. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 115(5).
- Nugroho, H. A., Subiantoro, A., Syam, S., & Kusumoputro, B. (n.d.). A Novel Ensemble Convolutional NARX Framework for Spatiotemporal Earthquake Frequency Prediction.
- Pavlenko, V. A., & Zavyalov, A. D. (2022). Comparative analysis of the methods for estimating the magnitude of completeness of earthquake catalogs. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 58(1), 89–105.
- Peña Castro, A. F., Schmandt, B., Nakai, J., & Chaput, J. (2024). ML-detected seismicity catalog of Antarctica: 2000–2021. *Seismological Research Letters*.
- Scudero, S., & D'Alessandro, A. (2025). Investigating the universal character of k–M slope in earthquake catalogs from the Visibility Graph method. *Geophysical Journal International*.

- Shibutani, T., Matsubara, M., Ohtani, M., Aoi, S., & Nakagawa, K. (2024). Recent advances in earthquake seismology using machine learning. *Earth, Planets and Space*, 76(1), 1–17.
- Stepnov, A., & Chernykh, V. (2021). The Seismo-Performer: A novel machine learning approach for general and efficient seismic phase recognition from local earthquakes in real time. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(18), 6290.
- Tan, Y. J., Waldhauser, F., Ellsworth, W. L., Zhang, M., Zhu, W., Michele, M., et al. (2021). Machine-Learning-Based High-Resolution Earthquake Catalog Reveals How Complex Fault Structures Were Activated during the 2016–2017 Central Italy Sequence. *The Seismic Record*, 1(1), 11–19.
- Wang, X., Li, J., Feng, A., & Sornette, D. (2025). Estimating Magnitude Completeness in Earthquake Catalogs: A Comparative Study of Catalog-Based Methods. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90(4), 859–869.
- Woessner, J., & Wiemer, S. (2005). Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(2), 684–698.
- Yuan, C., & Zhang, J. (2019). *Applying deep learning to teleseismic phase detection and picking: PcP and PKiKP cases*. arXiv preprint.
- Zhang, H., Wang, W., Wang, X., Chen, W., Zhou, Y., Wang, C., & Zhao, Z. (2019). An implementation of the seismic

resolution enhancing network based on GAN. *89th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts.*

# **PLATİN GRUBU ELEMENTLER VE KULLANIM ALANLARI\***

**Hüseyin SENDİR<sup>1</sup>**

**Kadir SARIİZ<sup>2</sup>**

## **1. GİRİŞ**

Soy metal olarak da isimlendirilen platin grubu elementler (PGE), periyodik tablonun 8B grubunda yer alan ve benzer fiziksel-kimyasal özellikler gösteren altı elementi kapsar. Bu elementler; platin (Pt), iridyum (Ir), osmiyum (Os), paladyum (Pd), rutenyum (Ru) ve rodyum (Rh)'dan oluşmaktadır (Şekil 1). Bu adlandırmanın iki temel nedeni vardır: Birincisi, bu metaller oldukça nadir bulunurlar. İkinci olarak, bunlar reaktif olmayıp metalik formları tamamen kararlıdır. Az oranda bulunmaları bu metallerin siderofil bir özellik sergilemelerinden kaynaklanmaktadır. Bu elementler, yüksek erime noktaları, kimyasal ataletleri, katalitik özellikleri ve değerli olmalarıyla tanınırlar (Hunt vd., 2020).

Yerkabuğunda konsantrasyonları yaklaşık %1 civarındadır. Demire karşı duyarlılıkları çok fazla olup, çekirdekte yoğunlaşmaktadırlar. Bu metaller, sülfürlü eriyikler içinde fazla miktarda zenginleştiklerinden aynı zamanda kalkofil element özelliği de sunarlar. Ir, içlerinde en fazla kalkofil

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-7252-7117

<sup>2</sup> Prof. Dr.; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (Emekli), ORCID: 0009-0008-3422-2724

\* Bu Çalışma 1. yazarın Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yaptığı Yüksek Lisans çalışmasının verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tez, 1485-5 nolu Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Araştırma fonu tarafından desteklenmiştir.

element özelliği gösterendir. Buna karşın Pt, Au ile en az kalkofil özelliktedir (Sendir, 2004).

# PERİYODİK TABLO

ATOM NUMARASI  
20  
Ca  
Kalsiyum

ATOM AĞIRLIĞI  
40,08

ANAKATAR  
KATILIM

Katı Elementler : Siyah  
Sıvı Elementler : Kırmızı  
Gaz Elementler : Mavi  
Yapay Elementler : Yeşil

Renklerle gösterilmiştir

| IIIA     |          | IVA     |  | VA |  |
|----------|----------|---------|--|----|--|
| 5<br>B   | 6<br>C   | 7<br>N  |  |    |  |
| 13<br>Al | 14<br>Si | 15<br>P |  |    |  |

| IIB      |           | IVB       |          | VIB      |          | VIIB     |          | VIII     |          | IIB      |          | IIIB     |  |
|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| 21<br>Sc | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr | 25<br>Mn | 26<br>Fe | 27<br>Co | 28<br>Ni | 29<br>Cu | 30<br>Zn | 31<br>Ga | 32<br>Ge | 33<br>As |  |
| 39<br>Y  | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo | 43<br>Tc | 44<br>Ru | 45<br>Rh | 46<br>Pd | 47<br>Ag | 48<br>Cd | 49<br>In | 50<br>Sn | 51<br>Sb |  |
| 57<br>La | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W  | 75<br>Re | 76<br>Os | 77<br>Ir | 78<br>Pt | 79<br>Au | 80<br>Hg | 81<br>Tl | 82<br>Pb | 83<br>Bi |  |
| 89<br>Ac | 104<br>Ku | 105<br>Ha | 106      | 107      | 108      | 109      | 110      | 111      | 112      | 113      | 114      | 115      |  |

**Şekil 1. PGE’lerin Periyodik Cetveldeki Yerleri.**

## 2. ÖNEMLİ MİNERALLERİ

Platin metallerinin yer aldığı yaklaşık 50 mineral bilinmektedir. Bunlar; nabit elementler, bozulmuş katı solüsyonlar, yarı metalik bileşikler, arsenidler, sülfidler ve sülfarsenidlerdir. Bozulmuş katı solüsyonlar; Poliektan (Pt, Fe), Ferroplatin (Fe, Pt), Paladyumlu platin (Pt, Pd), İridyumlu platin (Pt, Ir), İridosmin-nevyanskite (Ir, Os), İridosmin-sissertskit (Os, Ir) ve Rodyum-nevyanskite (Ir, Os, Rh)’tir. Yarı metalik bileşikler; Auridler (Kuproaurid (Cu, Pd<sub>3</sub>Au<sub>2</sub>)), Stannidler (Niglit (Pt, Pd)<sub>3</sub>Sn)), Bizmutitler (Frudit (PdB<sub>2</sub>)) Plumbitler ve Telluridler’dir. Arsenidler; Sperillit (PtAs<sub>2</sub>) ve Iridarsenid (IrAs)’lerdir. Sülfidler (Kooperit (PtS), Braggit (Pt, Pd, Ni)S, Vysotskit (Pd, Ni)S ve Laurit (RuS<sub>2</sub>)’lerdir. Sülfarsenidler; Holingworthit (Rh, Pt) (As, S)<sub>2</sub>, Irsit (IrAsS) ve Platersit

(PtAsS)'lerdir. Yaygın platin minerallerinden bazıları şunlardır (Sendir, 2004).

Sperrylite (PtAs<sub>2</sub>): Bu en yaygın platin mineralidir ve platinden oluşur ve arsenik. Tipik olarak nikel-bakır sülfür cevher yataklarında bulunur (Şekil 2).



**Şekil 2. Sperrylite Minerali (<https://tr.geologyscience.com/ore-minerals/platinum-ore/>).**

Cooperit (PtS): Bu, genellikle ultramafik kayalarındaki diğer platin mineralleri ile bulunan bir platin sülfür mineralidir.

Braggite ((Pt,Pd,Ni)S): Bu bir platin, paladyum ve nikel tabakalı intruziyonlarda ve ultramafik kayalarda yaygın olarak bulunan sülfür minerali. Tablo 1. Kararlı izotoplar jeokimyası incelemesinde yaygın olarak kullanılan bazı elementlerin izotopları ve analizlerde kullanılan standartlar (Akçay, 2002)

Platarsite (PtAsS): Bu, bazı platin cevheri yataklarında diğer platin mineralleri ile birlikte bulunan bir platin arsenik sülfür mineralidir.

Michenerite (PdBiTe): Bu bir paladyum bizmut bazı platin yataklarında genellikle platin mineralleri ile birlikte bulunan tellürit minerali.

Spinel grubu mineraller: Spinel grubundan bazı mineraller, örneğin kromit ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), eser miktarda platin de içerebilir (Sendir, 2004).

### **3. OLUŞUM ORTAMLARI**

Platin grubu elementler birçok mineral yapısında diğer elementlerin yerini almaktadırlar. Maden yataklarında göstermiş oldukları parajenez özelliklerine göre Ir grubu (Ir, Os, Ru) ve Pd grubu (Pd, Pt, Rh) olmak üzere iki ayrı sınıfa ayrılırlar. İlk sınıftakiler daha çok ultramafik kayalarda nabit metal alaşımları ve sülfütları şeklinde kromit ve spinellerin bir kısmında katı eriyik olarak bulunurken, ikinci sınıfa dahil olanlar ise daha çok gabrolarda Fe, Ni, Cu bileşimli magmatik sülfütlar şeklinde bulunurlar. Ayrıca, bazı halit oluşumlarında ve kloritlerin çeşitli formlarında da zenginleşebilirler (Sendir, 2004).

Platin grubu minerallerin jeolojisi ve oluşum süreçleri karmaşıktır ve tipik olarak benzersiz jeolojik ortamları ve mineralizasyon süreçlerini içerir. Platin grubu minerallerin cevher yatakları genellikle magnezyum açısından yüksek ve silis açısından düşük olan ultramafik kayalarla ilişkilidir. Bu kayalar peridotit, piroksenit ve dünit ve tipik olarak eski kıtasal kabuk alanlarında veya ofiyolit komplekslerinde bulunur (<https://tr.geologyscience.com/ore-minerals/platinum-ore/>).

Platin grubu minerallerin cevher yatakları genellikle tektonik plakaların dalması ve çarpışması gibi tektonik süreçlerle oluşur. Bir tektonik plakanın diğerinin altına itildiği yitim zonları, platin açısından zengin magma odalarının ve takip eden cevher yataklarının oluşumu için koşullar yaratabilir. İki tektonik plakanın bir araya geldiği çarpışma bölgeleri, kabuk erimesi ve magma yerleşimi gibi süreçlerle bu yataklar oluşabilir (<https://tr.geologyscience.com/ore-minerals/platinum-ore/>).

Bu yataklar öncelikle magmatik süreçlerle oluşur. Platin grubu mineraller bakımından zengin magmalar, Dünya'nın mantosunda üretilir ve magmanın yükselmesi, yerleştirilmesi ve kristalleşmesi gibi süreçlerle kabuğa taşınır. Bu işlemler sırasında, platin grubu mineraller magmadan ayrılabilir ve belirli bölgelerde birikerek cevherleşmeleri oluşturabilir (<https://tr.geologyscience.com/ore-minerals/platinum-ore/>).

Hidrotermal olaylar da bu yatakların oluşumuna katkıda bulunabilir. Hidrotermal sıvılar yerkabuğunda dolaşan sıcak, mineral açısından zengin sıvılar olup, mevcut kayalar ve minerallerle etkileşime girerek platin ve ilişkili minerallerin belirli alanlarda mobilizasyonuna ve konsantrasyonuna sebep olabilirler (<https://tr.geologyscience.com/ore-minerals/platinum-ore/>).

Bazen atmosferik etkilerle aşınma, erozyon ve tortulaşma gibi süreçlerle Platin cevheri yatakları oluşabilir. Bazı durumlarda, platin grubu mineraller nehirler, akarsular ve diğer doğal süreçlerle taşınabilir ve daha sonra ekonomik olarak çıkarılabilecekleri plaser yataklarında yoğunlaştırılabilir (<https://tr.geologyscience.com/ore-minerals/platinum-ore/>).

Platin grubu minerallerin jeolojisini ve oluşum süreçlerini anlamak, bu yatakların etkin bir şekilde keşfedilmesi ve kullanılması için çok önemlidir. Jeolojik özelliklerine ve

oluşum süreçlerine göre kategorize edilebilecek birkaç çeşit platin grubu cevheri yatağı vardır. Bunlar aşağıda belirtilmiştir.

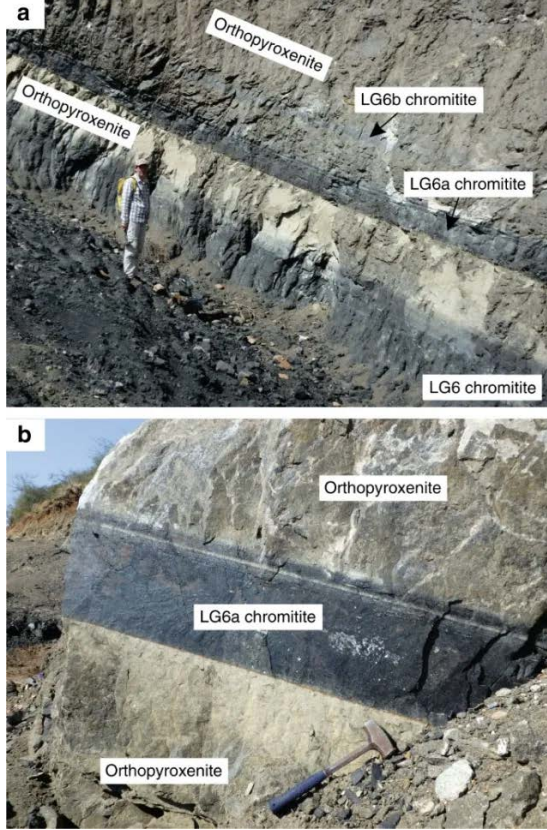
### **3.1. Likit Yataklar**

Platin metalleri, bakır ve nikel üretiminde önemli olan likit bakır-nikel sülfür yataklarından elde edilir, Cevherlerdeki platin metallerinin miktarları bulundukları yere göre değişir. Bazı yataklarda tonda 0,01 ile 0,1 gram arasında, bazılarında tonda 10 gram ile 1 gram arasında, bazılarında da tonda 10 gramdan daha fazla olabilir. Örnek olarak Kanada-Sudbury yatağında Frood damarının alt seviyelerinde konsantrasyon 5-20 ppm'e ulaşır. Bu yataklarda en çok paladyum (%65-72), sonra gelen platin (%15-25) ve rodyum (%1) bulunurken, diğer metallerin payları ise %1'den küçüktür. Platin minerallerinin önemli bir miktarı mineralojik olarak belirlenememiş cevher oluşturan sülfürler içinde ince bir karışım şeklinde oluşur, diğerleri 20 ile 100 m, nadiren birkaç milimetreye varan boyuttaki çok ince platin grup mineralleri şeklinde oluşur. Paladyum; bozulmuş katı solüsyonlar, platin, kalay, kurşun, nikel, kobalt, bakır ve bizmut ile yan metalik bileşikler ve ayrıca paladyum arsenidler ve tellüridler şekilde bulunur. Platin; nabit halde, katı solüsyonlar, arsenidler ve sülfürler şeklinde bulunur. Rodyum ve iridyum mineralleri çok nadirdir ve osmiyum genellikle bunlarla birlikte bulunmaz (<https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>).

### **3.2. Erken Magmatik Yataklar**

Kromspinellere bağlı platin metal segregasyonlarının genellikle, ultrabazik serilerin dunitlerinde, karbonatlar ile çevrili ultrabazik-alkalin kayalarla bağlı masifin merkezindeki dunitlerde ve tabakalanmış norit masiflerinde bulunduğu bilinmektedir. 15-20 ppm'lik cevher içindeki platin minerallerinin içeriği aşağıdaki şekilde dağılmıştır, (toplamın yüzdesi olarak): %60 platin, %27 paladyum, %5 rutenyum,

%2,7 rodyum, %0,7 iridyum, %0,6 osmiyum ve %4 altın şeklindedir (Şekil 3) (<https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>).



**Şekil 3. Platin İçeren Kromit Tabakaları. Güney Afrika'daki Bushveld Kompleksinin Masif Kromitit Katmanları. a. Doğu Bushveld Kompleksi Masif Kromititler, b. Cameron Bölümü Masif Kromititler (<https://doi.org/10.1038/s41467-017-02773-w>).**

### **3.3. Geç Magmatik Yataklar**

Geç magmatik platin metal yatakları bazik intrüziyonların dunit kısmı içindeki kromspinellere bağlı olarak bulunmaktadır, Sideronitik bir doku ile diğer cevherlerden ayrılan bu yataklar, litolojik birimleri kesen cevher kütleleri ile temsil edilirler ki bu cevher mineralleri, kayaç oluşturan

silikatların kristalleşmesinden sonra birikmişlerdir. Platin metalleri içeriği cevher taşıyan pipoların merkezine doğru artıp, 2 ile 30 ppm arasında değişmekte ve bazen 60 ppm'e de varabilmektedir (<https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>).

### **3.4. Plaser Yataklar**

Platin metalleri ve minerallerinin çoğu yüzey etkilerine karşı dayanıklıdır, Birincil platinli kayaçların su ve hava etkisiyle yıkanmış ve ufalanmış yüzey kesimlerinde, zor çözünen ve taşman kalıntıları olarak platin metalleri zenginleşir. Birincil cevherleşme fakirse, alüvyal zenginleşmeler de çoğunlukla işletilebilir cevherler vermezler. Buna karşın birincil bir platin cevherlerinin oksidasyon zonu çok daha ilginçtir. Demir şapka zonunda diğer dayanıklı minerallerle birlikte, demirli platin, platin-iridyum, sperilit ve altın zenginleşerek alüvyal plaserler oluşur. Kil, toprak, kum ve kaya parçalarından ibaret olan bu plaserlerin derin tasımları en yüksek platin tenörlerini içerirler. Platin minerallerinin plaser yatakları; platin, ferroplatin, kuproplatin, iridoplatin, nevyanskjt, rutenyum nevyanskjt ile iridyum ve platin alüv içerir. Alüvyal plaserlerdeki platin minerallerinin içeriği, metre küpte birkaç yüz gram ile birkaç miligram arasında değişir (Tuncay ve Kuşçu, 1993) (<https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>).

## **4. ÜRETİM**

Türkiye’de PGM üretimi bulunmamaktadır. Dünya PGM üretimleri aşağıda Tablo 1’de verilmiştir (<https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>).

Dünya metal PGM rezervinin toplamı 69Kton, görünür ve muhtemel rezerv toplamı ise 100Kton’dur. Rezervde en

önemli ülke G. Afrika'dır ve toplam rezervlerin %91'ine sahiptir (Tablo 2) (<https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>).

**Tablo 1. PGM Üretim Miktarları (Trademap (2020) Trade Statistics,Platinum, Palladium, Iridium, Rhodium).**

| Platin Grubu Metaller | Üretim Miktarı(ton) |
|-----------------------|---------------------|
| Platin                | 190                 |
| Paladyum              | 220                 |
| Rutenyum              | 30.5                |
| Rodyum                | 23                  |
| İridyum               | 7.3                 |
| Toplam                | 470.8               |

**Tablo 2. Dünya PGM Rezervleri ve Dağılımları (USGS Mineral commodity summaries PGM (2020)).**

| Rezervler                   |              |         | Yoğunlaşma Endeksleri |        |     |
|-----------------------------|--------------|---------|-----------------------|--------|-----|
| Ülkeler                     | Rezerv (ton) | Pay (%) | HH                    | CR4    | SW  |
| G. Afrika                   | 63000        | 91.30   | 8336.48               | 91.30  |     |
| Rusya                       | 3900         | 5.65    | 31.95                 | 5.65   |     |
| Zimbabve                    | 1200         | 1.74    | 3.02                  | 1.74   |     |
| ABD                         | 900          | 1.30    | 1.70                  | 1.30   |     |
| Kanada                      | 310          | 0.45    | 0.20                  |        |     |
| Toplam                      | 69000        | 100.00  | 8373.36               | 100.00 | 0.4 |
| Rezervde Kritik Ülke Sayısı |              |         |                       |        | 1   |

Rezerv G. Afrika'da yoğunlaşmıştır ve bu durum rezervde bu ülkeyi monopol durumuna getirmiştir. Endeks değerler de bu duruma çok yüksek çıkarak işaret etmiş ve kritik ülke sayısı 1 olarak bulunmuştur (<https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>).

Dünya üretiminde rezerv konusunda güçlü olan G. Afrika, Rusya, Kanada gibi ülkeler söz sahibidir (<https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>) (Tablo 3).

**Tablo 3. Dünya Platin Üretimi USGS Mineral commodity summaries PGM (2020)**

| Üretim (ton) | 2014   | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| G. Afrika    | 93.99  | 139.13 | 133.24 | 131.24 | 137.05 |
| Rusya        | 23.00  | 23.00  | 22.00  | 22.00  | 22.00  |
| Zimbabve     | 12.48  | 12.56  | 15.11  | 14.26  | 15.00  |
| Kanada       | 7.20   | 8.60   | 8.40   | 7.60   | 7.40   |
| ABD          | 3.66   | 3.67   | 3.89   | 4.00   | 4.16   |
| Çin          | 1.60   | 2.30   | 2.90   | 2.50   | 2.50   |
| Finlandiya   | 1.06   | 0.99   | 1.18   | 1.42   | 1.58   |
| Kolombiya    | 1.14   | 0.86   | 0.92   | 0.57   | 0.27   |
| Avustralya   | 0.17   | 0.12   | 0.17   | 0.17   | 0.12   |
| Etiyopya     |        | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |
| Sırbistan    | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| Toplam       | 145.00 | 191.00 | 188.00 | 184.00 | 190.00 |

Dünya Üretiminin %90'ından fazlası G. Afrika tarafından gerçekleştirildiği için G. Afrika tekel konumundadır. Dünya talebini G. Afrika karşılamaktadır (<https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>) (Tablo 3).

Dünya ham platin pazarı 8.1Milyar \$'lık bir hacme sahiptir. İhracatın 1/3'lük kısmını G. Afrika sağlamaktadır. Pazar yoğunlaşma bakımından ele alınacak olursa yoğunrekabetçi bir yapıya sahiptir. Kritik ülke sayısı 7 olarak tespit edilmiştir. Türkiye 4,7M\$'lık ihracat ile 26. Sıradadır (<https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>) (Tablo 4).

Dünya ham platin ithalatı rekabetçi sayılabilecek bir Pazar yapısına sahiptir. Pazarda yoğunlaşma, oligopson gibi riskler bulunmamaktadır. Türkiye 2,4M\$'lık ithalat ile 42. sıradadır. Türkiye +4,7M\$ ihracat ve 2,4M\$ ithalat ile net (+2,3 M\$) ham platin ihracatçısıdır (Tablo 5).

**Tablo 4. Dünya Ham Platin İhracatı Observatory of Economic Complexity (OEC) (2018).**

| İhracatçılar                 |              |         | Yoğunlaşma Endeksleri |       |      |
|------------------------------|--------------|---------|-----------------------|-------|------|
| Ülkeler                      | Miktar (M\$) | Pay (%) | HH                    | CR4   | SW   |
| G. Afrika                    | 2456.15      | 30.16   | 909.45                | 30.16 |      |
| B. Krallık                   | 1319.62      | 16.20   | 262.52                | 16.20 |      |
| Almanya                      | 766.50       | 9.41    | 88.57                 | 9.41  |      |
| İtalya                       | 711.35       | 8.73    | 76.28                 | 8.73  |      |
| ABD                          | 664.35       | 8.16    | 66.54                 |       |      |
| Rusya                        | 658.04       | 8.08    | 65.28                 |       |      |
| Belçika                      | 357.03       | 4.38    | 19.22                 |       |      |
| İsviçre                      | 304.19       | 3.73    | 13.95                 |       |      |
| Japonya                      | 278.95       | 3.43    | 11.73                 |       |      |
| Hong Kong                    | 179.53       | 2.20    | 4.86                  |       |      |
| Türkiye                      | 4.69         | 0.06    | 0.00                  |       |      |
| Diğer                        | 444.14       | 5.45    |                       |       |      |
| Toplam                       | 8144.55      | 100.00  | 1518.40               | 64.50 | 1.96 |
| İhracatta Kritik Ülke Sayısı |              |         |                       |       | 7    |

## 5. KULLANIM ALANLARI

Başta platinyum olmak üzere, platin grubu elementlerin oluşturduğu metallerin oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Teknolojik gelişmelere, özellikle elektronik sanayinin büyümesine bağlı olarak, bu metallerin kullanım miktarı ve alanı her geçen gün artmaktadır. Tıpta, dişçilikte, otomobil sanayinde, petrol endüstrisinde, dolmakalem uçlarında, fotoğrafçılıkta ve değişik kimya alanlarında özellikle katalizör olarak kullanılmaktadır. Ayrıca eritme krozeleri, tel, elektrot, halka, X ışınları ile çalışan sistemler, asit üretimi gibi alanlarda da sıkça kullanılır olmuştur. Ayrıca süs eşyası ve takı eşyalarının yapımında da yararlanılmaktadır. Bazik kayaçlarda PGE ile bulunan nikelin de kullanımı PGE gibi son derece önem arz etmektedir. Bu elementin diğer metallerle alaşımları bulunduğu gibi dayanımı artırıcı eleman olarak uçak ve füze sanayinde ve dayanıklı pil yapımında yoğun olarak kullanılmaktadır.

**Tablo 5. Dünya Ham Platin İthalatı Observatory of Economic Complexity (OEC) (2018).**

| İthalatçılar                 |              |         | Yoğunlaşma Endeksleri |       |      |
|------------------------------|--------------|---------|-----------------------|-------|------|
| Ülkeler                      | Miktar (M\$) | Pay (%) | HH                    | CR4   | SW   |
| Almanya                      | 1362.50      | 16.73   | 279.86                | 16.73 |      |
| ABD                          | 1232.97      | 15.14   | 229.18                | 15.14 |      |
| B. Krallık                   | 1149.43      | 14.11   | 199.17                | 14.11 |      |
| Makedonya                    | 837.86       | 10.29   | 105.83                | 10.29 |      |
| Japonya                      | 718.41       | 8.82    | 77.81                 |       |      |
| İsviçre                      | 527.19       | 6.47    | 41.90                 |       |      |
| Hong Kong                    | 512.80       | 6.30    | 39.64                 |       |      |
| İtalya                       | 394.77       | 4.85    | 23.49                 |       |      |
| Çin                          | 359.44       | 4.41    | 19.48                 |       |      |
| Hindistan                    | 129.31       | 1.59    | 2.52                  |       |      |
| Türkiye                      | 2.44         | 0.03    | 0.00                  |       |      |
| Diğer                        | 917.44       | 11.26   |                       |       |      |
| Toplam                       | 8144.55      | 100.00  | 1018.87               | 56.27 | 2.01 |
| İthalatta Kritik Ülke Sayısı |              |         |                       |       | 7    |

Kullanım alanlarını data detaylı ele aldığımızda aşağıdaki gibi bir tablo ortaya çıkmaktadır.

### 5.1. Otomotiv Sektörü

Platin, paladyum ve rodyum, özellikle benzinli ve dizel motorlu araçlarda egzoz gazı emisyonlarını azaltmak için kullanılan katalitik konvertörlerin yapımında kullanılır. Bu metaller, karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve hidrokarbonların (HC) çevreye zararlı gazlarını zararsız CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O'ya dönüştürür (Sun vd., 2019).

### 5.2. Kimya ve Petrokimya Sanayi

PGM'ler, birçok endüstriyel katalizörün bileşenidir. Özellikle platin, hidrojenasyon, reforming ve oksidasyon reaksiyonlarında aktif katalizör görevi görür. Amonyak üretiminde (Haber-Bosch süreci) ve nitrik asit sentezinde platin ve rodyum kullanılır (Davis, 2017).

### **5.3. Elektrik-Elektronik Endüstrisi**

İridyum ve rutenyum, yüksek sıcaklıklara dayanıklı elektrotlar üretiminde kullanılır. Platin, hassas elektronik devrelerde iletken ve koruyucu katman olarak kullanılır. Paladyum, seramik kapasitörlerde ve lehim alaşımlarında kritik bir bileşendir (Wrigley and Poole, 2018).

### **5.4. Mücevherat ve Saatçilik**

Platin, paladyum ve osmiyum, sertlik ve parlaklık özellikleri sayesinde yüksek kaliteli mücevher ve saat üretiminde tercih edilir. Platin, alerjik reaksiyonlara neden olmaması nedeniyle değerli takılarda yaygın olarak kullanılır (Sadiq and Husain, 2020).

### **5.5. Tıp ve Biyoteknoloji**

Platin bileşikler (özellikle cisplatin), çeşitli kanser türlerinin tedavisinde kemoterapötik ajan olarak kullanılır. İridyum ve platin, kalp pilleri ve diğer biyomedikal implantlarda elektrot materyali olarak görev alır. Paladyum, dişçilikte ve protez teknolojilerinde alaşım olarak kullanılır (Wang and Lippard, 2005).

### **5.6. Yenilenebilir Enerji ve Yakıt Hücreleri**

Platin, proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde (PEMFC) temel katalizör olarak kullanılır. Bu hücreler hidrojen gazını elektrik enerjisine dönüştürürken yalnızca su üretir, bu da onları çevreci enerji sistemleri için ideal hale getirir (Borup vd., 2017).

### **5.7. Cam ve Seramik Sanayi**

İridyum ve platin, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olduğundan cam ve seramik üretiminde ergitme kapları (crucibles) ve püskürtme sistemlerinde kullanılır (Fruehan, 2016).

## **6. SONUÇLAR**

PGM'ler, ekonomik ve stratejik açıdan kritik metaller arasında yer alır. Dünya rezervlerinin büyük kısmı Güney Afrika ve Rusya'da yoğunlaşmıştır. Bu nedenle PGM'lerin geri kazanımı ve geri dönüşümü hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük önem taşımaktadır (Hagelüken, 2011).

Platin grubu metaller, modern sanayinin ve teknolojinin pek çok alanında vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir kaynak yönetimi, geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi ve alternatif kullanım stratejileri büyük önem taşımaktadır.

Böylesine kullanım alanı bulunan ve buna bağlı olarak gelişen teknolojiyle hızla işlenip tüketilmekte olan platin grubu metallerin yeni yataklarının bulunması da son derece önem taşımaktadır (Sendir, 2004).

## **KAYNAKÇA**

- Borup, R. L., et al. (2017). Chemical Reviews, 117(3), 13102–13190.
- Davis, B. H. (2017). Catalysis Today, 288, 13–20.
- Fruehan, R. J. (2016). The Making, Shaping and Treating of Steel. AISE.
- Hagelüken, C. (2011). Metallurgical and Materials Transactions B, 42(4), 524–535.
- <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02773-w>
- <https://imib.org.tr/wp-content/uploads/platin.pdf>
- <https://tr.geologyscience.com/ore-minerals/platinum-ore/>
- Hunt, L. A., et al. (2020). Platinum Group Metals: A Global Market Overview. Elsevier.
- Sadiq, R., & Husain, T. (2020). Journal of Sustainable Design & Applied Research, 10(1), 55–62.
- Sendir, H. (2004). Karaburhan (Sivrihisar-Eskişehir) Yöresi Platin Grubu Elementlerinin Mineralizasyonu ve Dağılımı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, 56s.
- Sun, X., Liu, J., & Chen, C. (2019). Catalysis Today, 328, 12–18.
- Trademap (2020) Trade Statistics,Platinum, Palladium, Iridium, Rhodium
- Tuncay, A., & Kuşçu, M. (1993). Platin Grubu Metal ve Minerallerin Jeolojisi ve Ekonomisi. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 17(2), 89-95.Observatory of Economic Complexity (OEC) (2018)
- USGS Mineral commodity summaries PGM (2020)

- Wang, D., & Lippard, S. J. (2005). Nature Reviews Drug Discovery, 4(4), 307–320.
- Wrigley, C., & Poole, A. (2018). Platinum Metals Review, 62(4), 198–210.

**TÜRKİYE VE DÜNYADA  
YER BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ**

**yaz**  
yayınları

YAZ Yayınları  
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3  
İscehisar / AFYONKARAHİSAR  
Tel : (0 531) 880 92 99  
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com