



Masif ve ağsal cevher örneklerinin mineralojik ve jeomekanik açıdan incelenmesi

Mineralogical and geomechanical investigation of massive and stockwork ore samples

Kadir Karaman^{1*}, aaercan Şahinoğlu¹, Yunus İskender¹

¹Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
kadir.karaman@ktu.edu.tr, aaercan.sahinoglu@ktu.edu.tr, yunus.iskender@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 04.06.2025
Kabul Tarihi/Accepted: 14.08.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 08.08.2025

doi: 10.5505/pajes.2025.75222
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Kayaçların jeomekanik özellikleri, madencilikten tünelleğe kadar çeşitli jeoteknik uygulamalar için temel bir gerekliliktir. Öte yandan, metalik madenlerin çıkarılması, destek sistemlerinin planlanması ve üretim yönteminin seçimi için cevher ve çevresindeki kayaların jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Kayaçların jeomekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiş olsa da, cevherli kayaçlar üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır. Dolayısıyla, bu çalışmada ilk olarak aynı üretim aynasından alınan masif ve ağsal olmak üzere farklı cevherleşme tiplerinin jeomekanik ve mineralojik özellikleri incelenmiş olup her bir numune için tek eksenli basınç dayanımı (UCS), nokta yükü dayanım indeksi (PLI), indirekt çekme dayanımı (BTS), Schmidt çekici geri sıçrama sertliği (HR), ultrasonik P dalga hızı (UPV), yoğunluk ve gözeneklilik değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, cevher örneklerinin mineralojik özellikleri X-ışını difraktometresi (XRD) ve parlak kesit analizleri ile elementel dağılımları ise güncel bir analiz tekniği olan alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile incelenmiştir. Ayrıca, tüm cevher örneklerinin (aynı ve farklı üretim aynalarından alınanlar) dayanım tahminine yönelik dayanım dönüşüm faktörü (k) ve dönüşüm oranları (R) belirlenmiştir. UCS/PLI oranından elde edilen ortalama k değeri 13.98 ve UCS/BTS oranından elde edilen ortalama R değeri ise 11.24 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, sıfır-kesişim regresyon analizlerinden elde edilen katsayılar da ($UCS=13.90 \times PLI$ ve $UCS=11.20 \times BTS$) bu ortalama oranlarla yüksek derecede örtüşerek sonuçların tutarlılığını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Cevherleşme, jeomekanik özellikler, dayanım

Abstract

Geomechanical properties of rocks are a fundamental requirement for various geotechnical applications ranging from mining to tunnelling. On the other hand, determination of the geomechanical properties of ore and surrounding rocks is of great importance for the extraction of metallic minerals, planning of support systems and selection of the production method. Although the geomechanical properties of rocks have been extensively studied, research on ore rocks is limited. Therefore, in this study, the geomechanical and mineralogical properties of different mineralisation types, including massive and stockwork, taken from the same production faces were first investigated and uniaxial compressive strength (UCS), point load strength index (PLI), indirect tensile strength (BTS), Schmidt hammer rebound hardness (HR), ultrasonic P wave velocity (UPV), density and porosity values were determined for each sample. In addition, the mineralogical properties of the ore samples were analysed by X-ray diffractometer (XRD) and polished section analyses, and the elemental distributions of the ore samples were examined by field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), which is an up-to-date analysis technique. In addition, strength conversion factor (k) and conversion ratios (R) were determined for strength estimation of all ore samples (from the same and different production faces). The average k value obtained from the UCS/PLI ratio was 13.98 and the average R value obtained from the UCS/BTS ratio was 11.24. In addition, the coefficients obtained from the zero-intercept regression analyses ($UCS=13.90 \times PLI$ and $UCS=11.20 \times BTS$) were highly consistent with these average ratios, indicating the consistency of the results.

Keywords: Ore mineralisation, geomechanical properties, strength

1 Giriş

Kayaçların jeomekanik özelliklerinin saptanması ve nasıl tepki vereceklerinin tahmin edilmesi, emniyetli, sürdürülebilir ve maliyet etkin mühendislik tasarımları oluşturmak, yeraltı zenginliklerini verimli kullanmak ve doğal risklere karşı önlem almak adına hayati bir zorunluluktur [1]. Literatürde çok sayıda araştırmacı çalışmalarında farklı kaya ve kömür malzemelerinde kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirmiş, ihtiyaç duydukları bazı jeomekanik özellikleri (tek eksenli basınç dayanımı (UCS), nokta yükü dayanım indeksi (PLI), indirekt çekme dayanımı (BTS), görünür gözeneklilik, kuru yoğunluk (KY), doymuş yoğunluk (DY), ultrasonik P dalga hızı (UPV), vb.) araştırmışlardır [2]-[11]. Bununla beraber, söz konusu deneyler oldukça sınırlı sayıda metalik maden örneklerinde uygulama alanı bulmuştur. Yetkin [9] yaptığı

çalışmada oda topuk yöntemiyle üretim yapılan bir kurşun çinko madeninin farklı topuk boyutlarında tavan ve tabanda meydana gelen düşey gerilmeyi modelleyerek hesaplamıştır. Mallı ve diğ. [7] yaptıkları çalışmada metalik bir madende yeraltındaki açıklık alanı ve topuk boyutlarının belirlenmesinde kaya malzemesinin jeomekanik özelliklerinden faydalanmıştır. Luo ve diğ. [12] Çin'deki bir derin madende (kurşun-çinko) farklı kazı yöntemleriyle üretilen düzensiz kaya ve cevher numuneleri üzerinde nokta yük dayanım testleri gerçekleştirmişlerdir.

Karaman ve Kolaylı [13] kayaç ve cevher gibi malzemelerin mikro yapıları ve alterasyon koşulları açısından değişimlerini anlamak, tüneller, şevler ve madencilik gibi jeoteknik projelerin güvenliğini ve uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamak için önemli olduğundan bahsetmişlerdir. Madencilikte cevherin içerdiği minerallerin belirlenmesinde X-ışını difraktometresi

*Yazışılan yazar/Corresponding author

(XRD), cevher mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır [14]. Bununla birlikte yakın zamanda alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) mineralojik incelemeler için kullanılmaya başlanmıştır [15]. FE-SEM, yüksek kalitede, net, detaylı ve üç boyutlu görüntüler sunarak malzemelerin morfolojisini anlamada kritik bir araçtır [15]. Cevherin içerdiği minerallerin tespit edilmesiyle, cevherlerin daha verimli bir şekilde işlenmesi ve değerli minerallerin daha etkin bir şekilde geri kazanılması sağlanabilmektedir [16]. Metalik madenlerin mineral karakterizasyonu, madenlerin etkin ve sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için vazgeçilmez bir süreçtir. Ek olarak, doğru ve ayrıntılı bir tanımlama, en uygun zenginleştirme metotlarının seçimi, üretimde verimliliğin artırılması ve çevresel etkilerin azaltılması için bir zemin oluşturmaktadır [17].

Kayaçların önemli bir jeomekanik özelliği olan UCS parametresi için standart ölçümler yüksek kaliteli karot örnekleri gerektirirken, araştırmacılar PLI ve BTS gibi pratik yöntemlerle UCS'yi tahmin etmek amacıyla dönüşüm faktörleri ($k=UCS/PLI$ ve $R=UCS/BTS$) geliştirmişlerdir [1], [11], [18]. Özellikle doğal taşlar ve kömür için bu faktörler yaygın olarak çalışılmış olsa da, metalik madenlerdeki çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu çalışmanın amacı farklı cevherleşme içeren örneklerin (masif ve ağsal cevher) bazı önemli jeomekanik özelliklerini belirlemek ve XRD-Rietveld ve FE-SEM analiz sonuçlarıyla destekleyerek karşılaştırmaktır. Ayrıca, metalik maden örneklerinin dayanımını dolaylı olarak belirlemede dönüşüm faktörlerinin (k ve R) kullanımını araştırmaktır.

2 Malzeme ve yöntem

Bu çalışmada; Karadeniz Bölgesi'ndeki bir maden ocağından masif (C1) ve ağsal (C2) cevher içeren temsili blok örnekleri alınmıştır. İlk olarak XRD, parlak kesit ve FE-SEM analizleriyle malzemenin mineralojik, dokusal ve elementel özellikleri belirlenmiştir. Cevher bloklarından hazırlanan karot örnekler ise UCS, PLI, BTS, UPV, HR (blok örneklerde), yoğunluk ve gözeneklilik deneyleri yapılmıştır.

2.1 Malzeme

Numuneler önce kaba kırıcılarla 5 mm altına indirilerek örnek bölücü ile temsili alt numuneler alınmıştır. Bu numuneler halkalı değirmende toz haline getirilip XRD (Bruker D8 Advance), parlak kesit (polarizan mikroskop) ve FE-SEM (Thermo Scientific Apreo 2S) analizleri için hazırlanmıştır ve hava geçirmez poşetlerde saklanmıştır. Cevher numunesi XRD için -25 µm boyutuna öğütülmüştür. Mineralojik incelemeler için parlak kesitler hazırlanmıştır. Kalıplara vazelin sürülüp numuneler epoksi ile sabitlenmiş, ardından farklı numaralarda zımparalarla yüzeyleri parlatılmış ve mikroskopta incelenmiştir. FE-SEM analizleri için masif ve ağsal cevher örnekleri kullanılmıştır.

2.2 Yöntem

UCS deneylerinde, boy/çap (L/D) oranı 2.0 olan NX (54.7 mm) çaplı silindirik karot numuneleri kullanılmıştır. Deney 300 tonluk pres ile 0.75 MPa/s yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. UCS değerleri, her örnek için 5 adet karot örneği üzerinde gerçekleştirilen deneylerin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

UCS deneyi öncesinde aynı silindirik karot örnekleriyle örselemesiz bir işlem olan UPV ölçümü yapılmıştır. Ölçümlerden önce numunelerin uç yüzeyleri, iyi bir bağlantı için yeterince pürüzsüz ve düz olacak şekilde parlatılmıştır.

Nokta yükü dayanım indeksi deneyi için çapı 54.7 mm ve L/D oranları yaklaşık 0.5 olan silindirik olan karot örnekler (her cevher türü için 6-10 adet) kullanılmıştır. Deneylerde eksenel PLI test yöntemi dijital test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kayaçların PLI değerlerinin belirlenmesinde aşağıdaki eşitliklerden yararlanılmıştır.

$$Is = P / (De^2) \quad (1)$$

$$F = (De/A)^{0.45} \quad (2)$$

$$De^2 = 4A/\pi \quad (3)$$

$$Is_{(50)} = Fx Is \quad (4)$$

Eşitlikte; P: Uygulanan yük (kN), F: Boyut düzeltme faktörü, $Is_{(50)}$ (PLI): 50 mm çaplı karota göre düzeltilmiş nokta yük dayanımı (MPa), De: eşdeğer karot çapı (mm), A (WxD): Konik başlıkların temas noktalarından geçen örneğin kesit alanı, W: Genişlik (mm), D: Kalınlık (mm)

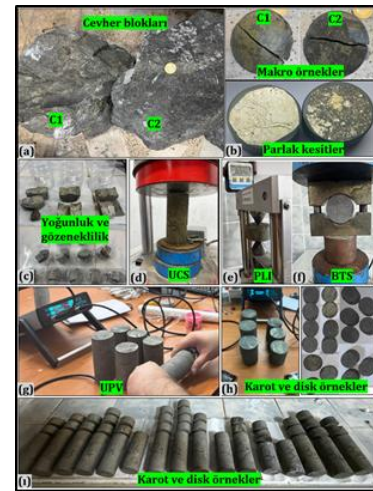
Cevher içeren örnek yüzeylerine ait 20 farklı noktadan okuma alınarak, en yüksek 10 değerın ortalaması Schmidt çekici geri sıçrama sertliği olarak kaydedilmiştir. Laboratuvar ortamında blok örnekler üzerinde Schmidt çekici deneyleri yapılmıştır.

Endirekt çekme dayanımı deneyleri, çapları 54.7 mm, L/D oranları yaklaşık 0.5 olan silindirik örneklerle 5 ton kapasiteli hidrolik preste 0.2 MPa/sn yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme dayanımı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$\sigma_t = 2P/\pi DL \quad (5)$$

Eşitlikte; σ_t (BTS): Endirekt çekme dayanımı (MPa), P: Uygulanan yük (kN), D: Numune çapı (cm) ve L: Numune kalınlığı (cm)

PLI ve BTS testlerinde kırılan numuneler kaplara koyularak suya doyurulması amacıyla 48 saat bekletilmiştir. Suya doymuş örnekler yüzeyleri kurularak tartılmış ve etüve bırakılmıştır. 24 saat boyunca 105 °C'de ± 1 °C kurutulmuş ardından tartılmıştır. Mezür (dereceli silindir) kullanılarak hacimleri hesaplanan örneklerin KY, DY ve gözeneklilik tayini yapılmıştır. UCS deneyleri ASTM [19], diğer deneyler (BTS, PLI, UPV ve HR) ISRM [20] tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmış olup deneylere ilişkin bazı görüntüler Şekil 1'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar her bir deney için ortalamalar alınarak Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Laboratuvar çalışmalarından görüntüler (a-h) ve farklı üretim aynalarından alınan örnekler (i)).

Figure 1. Images from laboratory studies (a-g).

Tablo 1. Deneysel çalışma sonuçları.
Table 1. Results of the experimental study.

Kod	UCS (MPa)	PLI (MPa)	BTS (MPa)	HR	UPV (m/s)	n (%)	KY (gr/cm ³)	DY (gr/cm ³)
C1	95.34±9.04	6.48±2.0	8.80±1.7	44	5215±136	1.67±0.5	3.58±0.04	3.60±0.05
C2	99.20±22.8	7.21±3.3	9.04±2.1	48	4772±317	2.01±0.7	3.39±0.04	3.41±0.05
Ortalama	97.27	6.85	8.92	46	4994	1.84	3.49	3.51

3 Bulgular ve irdeleme

3.1 Cevher örneklerinin mineralojik ve elemental içerikleri

Bu çalışmada volkanojenik masif sülfid cevherleşmesine ait iki farklı cevher örnekleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan örnekler masif/breşik cevher ile ağsal/saçınımlı cevher yapıları göstermektedir. XRD-Rietveld analiz sonuçlarına göre masif ve ağsal cevherde aynı mineral yapıları farklı oranlarda görülmektedir (Tablo 2). Örnekler yaygın olarak kalkopirit, sfalerit, galen ve pirit minerallerini içermekte olup, gang olarak dolomit ve kuvars mineralleri belirlenmiştir. Masif cevher ve ağsal cevherin sırasıyla yaklaşık %66 ve %43 oranında sülfid içeriğine sahip oldukları anlaşılmaktadır.

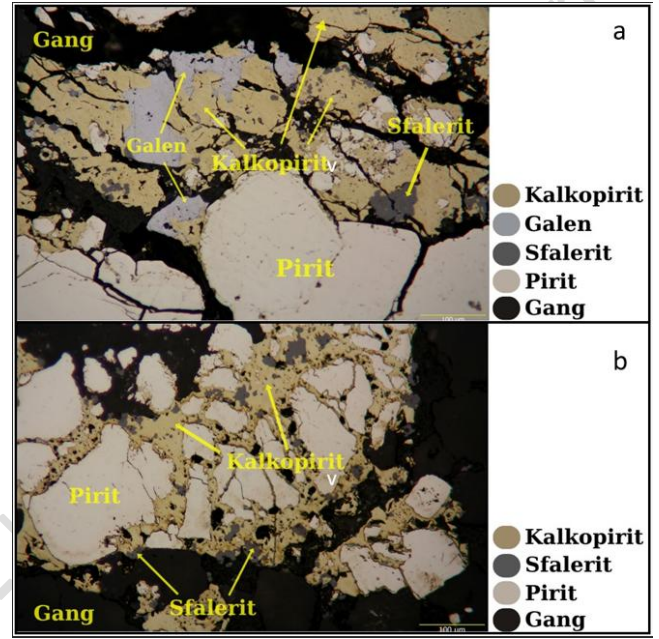
Tablo 2. Masif ve ağsal cevher örneklerinin XRD analiz sonuçları.

Table 2. XRD analysis results of massive and stockwork ore samples.

Mineraller	Masif cevher	Ağsal cevher
	Ağırlıkça yüzde (Wt%)	Ağırlıkça yüzde (Wt%)
Kalkopirit	45.8	14.3
Sfalerit	6.6	11.2
Galen	4.7	4.9
Pirit	8.7	13.0
Kuvars	30.8	54.6
Dolomit	3.4	2.0
Toplam	100	100

Şekil 2'de cevher örneklerinin parlak kesit görüntüleri yer almaktadır. Parlak kesit incelemelerine göre; masif cevher, ince-orta taneli (0.1-0.5 mm) pirit minerallerinin kırık ve çatlakları boyunca kalkopirit, sfalerit, galen gibi cevher minerallerinin yanında kuvars ve karbonat gibi gang mineralleri tarafından doldurulduğu görülmüştür. Ağsal cevher, silisleşme ve karbonatlaşmaya uğramış dasitler içerisinde yer yer bol kırıklı ve parçalanmış halde, yer yer gang mineralleri içerisinde kümelenmiş ve bazen de ince taneli saçınımlar halinde dağılmış pirit, kalkopirit, sfalerit ve galen minerallerinden oluşmuştur.

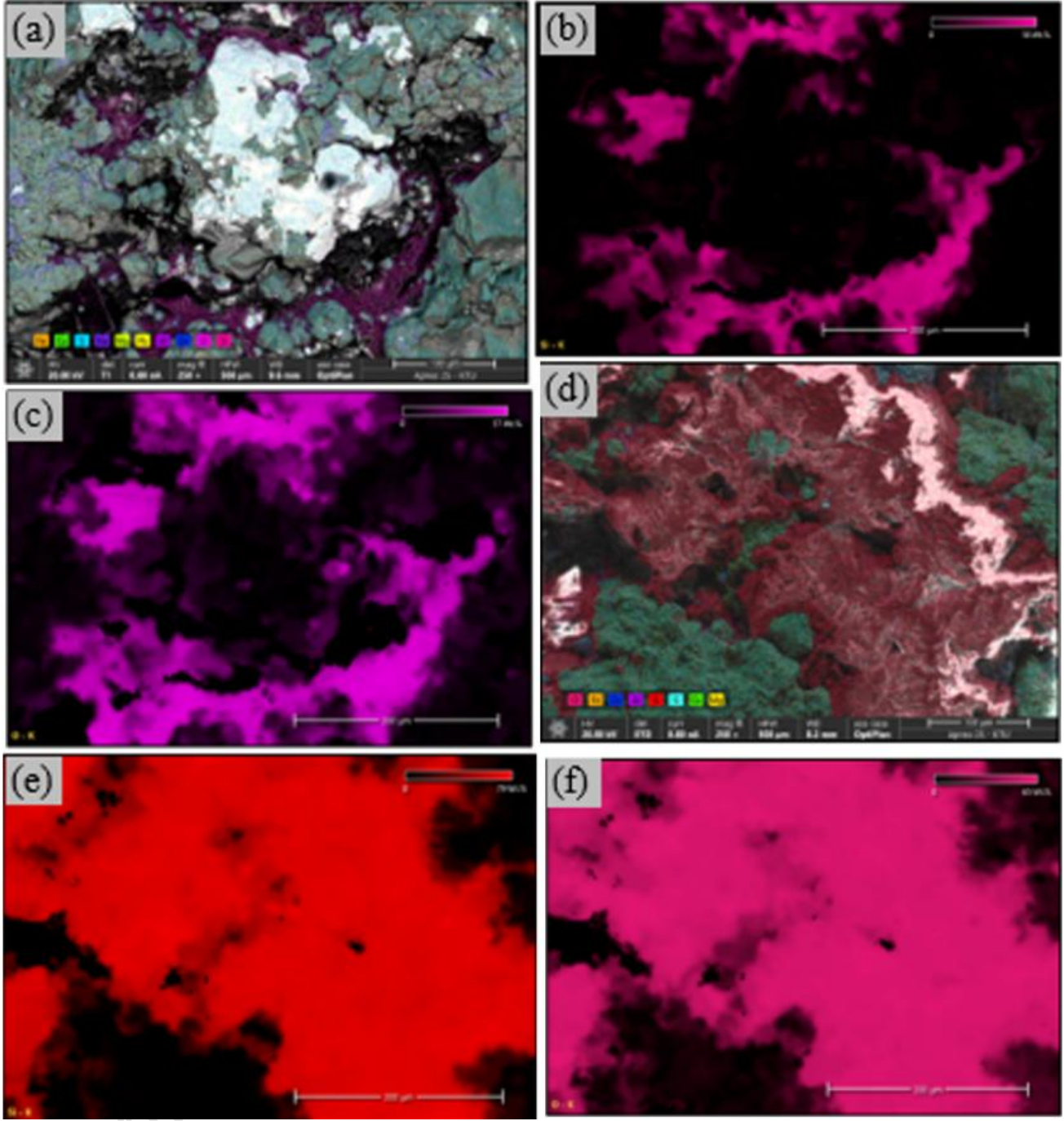
Masif ve ağsal cevher örneklerinin yüzey morfolojisi ve elementel haritalaması Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu haritalama, numunedeki elementlerin bölgesel yoğunluklarını görsel olarak aktarmaktadır. Buna göre, belirli bir rengin baskın olduğu yerler, o elementin yoğun olduğu anlamına gelirken, farklı renklerin bir arada bulunması ise çeşitli elementlerin karışımını veya etkileşimini ifade etmektedir.



Şekil 2. C1 kodlu örneğin parlak kesit görüntüsü (a), C2 kodlu örneğin parlak kesit görüntüsü (b).

Figure 2. Polished cross-sectional image of sample C1 (a), polished cross-sectional image of sample C2 (b).

Şekil 3 incelendiğinde masif cevherde silisyum içeren minerallerin ağsal cevhere kıyasla oldukça az olduğu görülmektedir. Şekil 3a ve 3d sırasıyla masif ve ağsal cevherin içerdiği elementel haritalamayı göstermektedir. Şekil 3b ve 3e'de sadece örnek içindeki silisyum içeren mineraller (kuvars) renkli olarak görünmektedir. Şekil 3c ve 3f'de ise aynı örneğin oksijen içeriğini ifade etmektedir. Dolayısıyla kuvars mineralinin kimyasal içeriği SiO₂ olduğundan örnek içindeki dağılımı net bir şekilde ayırt edilebilmektedir. C2 örneğinin (ağsal) kuvars içeriği C1 örneğine kıyasla oldukça yüksektir. Tablo 1'de de görüldüğü gibi ağsal cevherin kuvars içeriği (%54.6) oldukça yüksektir. Ayrıca, ağsal örneklere ait parlak kesit analizinde (Şekil 2b) siyah renkle gösterilen bölgeler kuvars gibi gang minerallerine işaret etmektedir.



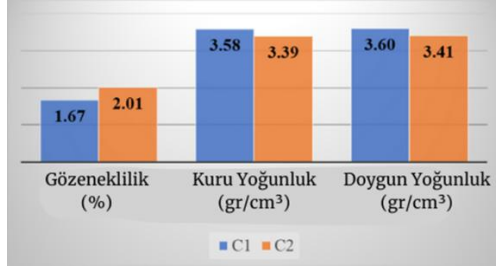
Şekil 3. Masif (a-c) ve ağsal (d-f) cevher örneklerinin FE-SEM görüntüleri.

Figure 3. FE-SEM images of massive (a-c) and stockwork (d-f) ore sample

3.2 Cevher örneklerinin kaya mekaniği deney sonuçları

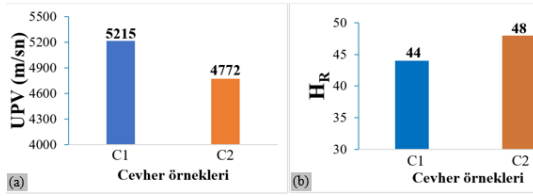
Elde edilen deney sonuçları incelendiğinde C1 (masif) bloğundan alınan örneklerde C2 (ağsal) bloğuna göre yoğunluğun fazla, gözenekliliğin ise nispeten daha düşük bir değere sahip olduğu görülmüştür (Şekil 4). Gözenekliliği az ve yoğunluğu fazla olan C1 karot örneklerinde UPV değeri C2 bloğundan %9.3 fazla ölçülmüştür (Şekil 5a). Cevher yüzeylerinin Schmidt çekici geri sıçrama sertliği, gang (kuvars)

minerallerinin yüzey sertliğinden daha düşük ölçülmüştür. Farklı minerallerin sertlik değerleri değişken olmasına rağmen genel olarak C2 örneklerinde nispeten daha yüksek değerler elde edilmiştir (Şekil 5b).



Şekil 4 Gözeneklilik ve yoğunluk deneyi sonuçları.

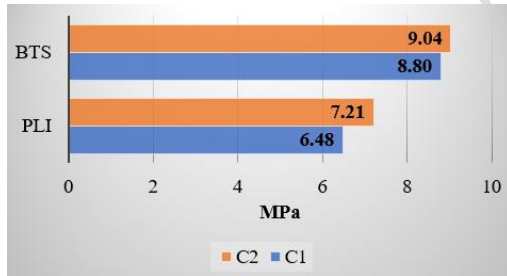
Figure 4 Porosity and density test results.



Şekil 5. Masif ve Ağsal cevherin UPV (a) ve HR (b) deney sonuçları.

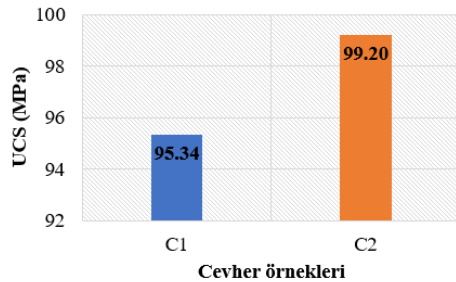
Figure 5. UPV (a) and HR (b) test results of massive and stockwork ore.

Cevher bloklarının dayanım parametrelerinde ise C2 bloğundan alınan örneklerin C1 bloğu örneklerine kıyasla BTS, PLI ve UCS değerleri sırasıyla %2.7, %11.2, %4 fazla ölçülmüştür (Şekil 6, Şekil 7). Bununla beraber, her iki tür cevherin mekanik özelliklerinin birbirine nispeten yakın olduğu görülmektedir. Cevherleşme özellikleri farklılık gösterse de, bu iki cevher türünün, maden ocağında nispeten benzer jeolojik koşullar altında ve aynı üretim aynalarından alınmış olması, deneysel sonuçların birbirine yakın çıkmasında rol oynamış olabilir. Yine de, aynı üretim aynasında dahi lokal jeolojik ve yapısal farklılıkların mekanik özellikler üzerinde etkisi olabileceği akıldan tutulmalıdır.



Şekil 6. PLI ve BTS deney sonuçları.

Figure 6. PLI and BTS test results.



Şekil 7. UCS deney sonuçları.

Figure 7. UCS test results.

Literatürde az sayıda metalik maden örneklerinin jeomekanik özelliklerine yönelik çalışma bulunmaktadır. Mallı ve diğ. [7] çalışmalarında kompleks (kurşun, çinko) bir metalik kaya bloğunda UCS değeri ölçümünü 80.32 MPa olarak gerçekleştirmiştir. Luo ve diğ. [12] yaptıkları çalışmada cevherli kayaçların dayanımını 73.58 MPa olarak belirlemiştir. Yetkin [9] çalışmasında aynı (kurşun, çinko) kompleks cevherde yoğunluğu 3.4 gr/cm³ olarak ölçmüştür. Bu çalışmadan elde edilen cevher örneklerinin dayanımı nispeten literatürle uyumlu çıkmıştır.

Chen ve diğ. [21] mineralojik bileşimin sedimanter kayaçların UCS parametresi üzerindeki etkileri konusunda yaptıkları araştırmada kuvars içeriğinin artırılması kumtaşı dayanımını artırmaya yardımcı olurken karbonat dayanımını azalttığını deneysel olarak göstermişlerdir. Bu sonuçlar kuvars içeriğinin artmasının bütün kayaçlarda dayanımın artmayacağı aksine düşebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca, ağsal cevherde her ne kadar kuvars içeriği artmış olsa da pirit içeriği de %8.7'den %13'e yükselmiştir. Karaman ve diğ. [22] kayaçların fiziksel parametreleri (kohezyon, içsel sürtünme açısı, birim hacim ağırlık, ultrasonik P dalga hızı) ve pirit içeriğinin (%) kayaçların UCS parametresi ile ilişkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, kayaçların dayanım ve pirit içeriği arasında orta derecede bir ilişki bulmuşlardır. Çalışmada çoklu regresyon analizi de yapılarak dayanım tahmininde güçlü determinasyon katsayısı ($R^2=0.936$) elde edilmiştir. Ayrıca, kayaç örneklerindeki düşük pirit içeriğinin (<%1) bile dayanımı %3.47 oranında olumsuz etkilediği yapılan istatistiksel analizlerle ortaya konulmuştur. Diğer kayaçlardaki farklı sonuçlar nedeniyle metalik maden içeren kayaçlardaki kuvars gibi gang minerallerinin dayanımını ne ölçüde etkilediğine dair daha kapsamlı araştırmalar yapılması gerekmektedir.

3.2.1 Dayanım tahmininde dönüşüm faktörlerinin kullanılması

Tahir ve Karaman [18] UCS değerleri 71.13 ila 182 MPa arasında değişen 5 farklı bazaltta dönüşüm faktörü (k) değerini ortalama 17.1 olarak hesaplamıştır. Şahin ve diğ. [23] çalışmalarında UCS dayanımları 16.98 ila 111.04 MPa arasında değişen 12 farklı tip kayaçta PLI ile UCS dayanımı korelasyonunu araştırmış ve kayaçların ortalama k değerini 14.2-14.9 olarak hesaplamışlardır. Kayaçlara yönelik çok sayıda veri bulunmasına rağmen cevher içeren örneklerde dayanım dönüşüm faktörünün belirlenmesine yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Luo ve diğ. [12] nokta yükü dayanımının belirlenmesinde kullanılan örneklerin örselenme etkisini araştırdıkları çalışmada kurşun ve çinko cevher örneklerine ait k değerlerinin ($k=58.86$) ISRM [20] tarafından önerilen değerlerden (20-25) yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Yazarlar söz konusu yüksek k değerlerinin derin madencilikte, mekanik kazı ve patlatma titreşimi gibi dinamik bozulmalar cevher ve kaya örneklerinde iç hasara neden olarak düzensiz cevher ve kaya örneklerinin nokta yük dayanımında azalmaya yol açtığını vurgulamıştır. Bu çalışmada deneyler (UCS, PLI, BTS ve diğ.) taze karot örneklerinde gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, aynı üretim aynasından alınan C1 ve C2 örnekleri ile aynı ocağa ait farklı üretim aynalarından alınan masif (C1-2, C1-3, C1-4, C1-5) ve ağsal cevher örnekleri (C2-2, C2-3, C2-4, C2-5) birlikte değerlendirilmiş ve ortalama k değerleri 13.98 olarak hesaplanmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Dayanım dönüşüm faktörü (k) ve dayanım oranı (R).

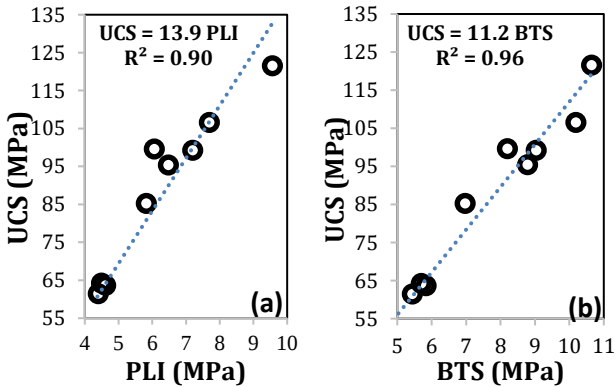
Table 3. Strength conversion factor (k) and strength ratio (R).

Kod	UCS (MPa)	PLI (MPa)	BTS (MPa)	UCS/PLI (k)	UCS/BTS (R)
C1-1	95.34	6.48	8.80	14.71	10.84
C1-2	64.19	4.50	5.70	14.26	11.26
C1-3	63.64	4.63	5.84	13.75	10.90
C1-4	61.43	4.41	5.44	13.93	11.29
C1-5	51.65	4.37	4.73	11.82	10.92
C2-1	99.20	7.21	9.04	13.76	10.97
C2-2	106.51	7.70	10.20	13.83	10.44
C2-3	121.51	9.57	10.65	12.70	11.41
C2-4	99.55	6.07	8.21	16.40	12.13
C2-5	85.2	5.83	6.98	14.61	12.21
Ortalama:				13.98	11.24

Literatür, kayaçların tek eksenli basınç dayanımını tahmin etmek için çekme dayanımı (doğrudan ve/veya dolaylı) ile pratik korelasyonlar sunmaktadır. Genel bir kabul, UCS'nin çekme dayanımının yaklaşık 10 katı olduğu yönündedir. Ancak, UCS/BTS oranı kayaç türüne göre geniş bir aralıkta (birçok kayaç için 10-50, sağlam kayaçlarda 4-25, homojen/izotropik kayaçlarda 8-12) değişiklik gösterebilmektedir [24]-[26]. Tablo 3'te bu çalışmadan elde edilen dayanım oranları (R) ayrı ayrı ve maden yatağı için ortalama olarak yer almaktadır. Literatürdeki çalışmaların sonuçlarıyla nispeten uyumlu olarak, bu çalışmada da cevher numunelerinin UCS değerleri, çekme dayanımlarına kıyasla yaklaşık ortalama 11 kat (11.24) daha yüksek bulunmuştur.

3.3 3.4. Sıfır-Kesişim Regresyon Analizi

Tablo 3'te sunulan UCS/PLI ve UCS/BTS oranlarından elde edilen k ve R katsayılarının yanı sıra, kayaçların UCS ile PLI ve BTS parametreleri arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla sıfır-kesişim regresyon analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin grafiksel sonuçları Şekil 8'de gösterilmekte olup, parametreler arasında güçlü doğrusal ilişkiler gözlenmektedir.



Şekil 8. Sıfır-kesişim regresyon analizleri, UCS-PLI (a) ve UCS-BTS (b)

Figure 8. Zero-intercept regression analyses, UCS-PLI (a) and UCS-BTS (b)

Kayaçların UCS ve PLI arasındaki sıfır-kesişim regresyon analizi sonucunda $UCS=13.90 \times PLI$ denklemi elde edilmiştir. Bu modelin R^2 değeri 0.90 olup, UCS değişiminin yaklaşık %90'ını açıklamaktadır. Regresyon katsayısının istatistiksel anlamlılığı için yapılan t-testinde, hesaplanan t değeri ($t_{hesap}=10.47$) kritik

t değerinden ($t_{tablo}=2.26$) büyük bulunmuş ve $p<0.05$ değeri elde edilmiştir. Bu durum, PLI'nın UCS'yi %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü bir şekilde tahmin ettiğini göstermektedir.

Benzer şekilde, UCS ile BTS arasındaki sıfır-kesişim regresyon analizi ise $UCS=11.2 \times BTS$ denklemini vermiştir. Bu modelin R^2 değeri 0.96 ile oldukça yüksek olup, UCS değişiminin %96'sını açıklamaktadır. Yapılan t-testi sonucunda hesaplanan t değeri ($t_{hesap}=13.47$) kritik t değerinden ($t_{tablo}=2.26$) büyük bulunmuş ve $p<0.05$ değeri elde edilmiştir. Bu bulgular, BTS kullanılarak UCS'nin yüksek bir doğrulukla tahmin edilebileceğini %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı ve yüksek derecede korelasyon göstererek açıkça ortaya koymaktadır. Yapılan analizler, sıfır-kesişim regresyonu ile hesaplanan katsayıların, UCS/PLI ve UCS/BTS oranlarından elde edilen ortalama katsayılarla (Tablo 3) büyük ölçüde örtüştüğünü göstermiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, bir metalik maden yatağından alınan masif ve ağsal dokuya sahip cevher örneklerinin bazı jeomekanik davranışları laboratuvar ortamında tespit edilmiş, bu davranışlar arasındaki farklılıklar ortaya konulmuş ve UCS değerinin pratik yollarla tahminine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Aynı üretim aynasından alınan cevher örneklerinin mekanik davranışları benzerlik gösterse de, düşük çekme ve nokta yük dayanımı değerleri iki örnek arasındaki ufak farkların daha belirgin olarak algılanmasını sağlamıştır. Söz konusu farkların görünür gözeneklilik, P dalga hızı ve yoğunluk gibi fiziksel özelliklerde nispeten daha belirgin olduğu anlaşılmıştır. Her ne kadar aynı kazı aynasından alınmış olsalar da, farklı jeomekanik özelliklere sahip formasyonların bulunabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla birlikte, jeomekanik deney sonuçlarının birbirine yakın çıkması nedeniyle, masif ve ağsal cevherin birlikte değerlendirilebileceği görülmüştür. Ancak, parlak kesit, XRD ve FE-SEM analiz sonuçları mineral içeriklerinin oldukça farklı olmasından dolayı ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

Çalışma kapsamında ayrıca tüm cevher örnekleri için ortalama dayanım dönüşüm faktörü (k) 13.98 ve ortalama dayanım oranı (R) 11.24 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, literatürde kayaçlar için elde edilen değerlerle genel olarak uyumludur. Ayrıca, sıfır-kesişim regresyon analizlerinden elde edilen katsayılar ($UCS=13.90 \times PLI$ ve $UCS=11.20 \times BTS$) bu ortalama oranlarla yüksek derecede örtüşerek sonuçların tutarlılığını ve UCS'nin PLI ve BTS ile yüksek doğrulukla tahmin edilebilirliğini kanıtlamıştır.

Metalik madenlerin jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi ve analizine yönelik yapılan çalışmalar madencilik faaliyetlerinin güvenli, verimli ve ekonomik bir şekilde yürütülmesi için kritik öneme sahiptir. Bu sebeple, metalik maden numunelerinin jeomekanik karakterizasyonuna odaklanan bilimsel araştırmaların artırılması büyük önem arz etmektedir.

5 Conclusions

In this study, some geomechanical behaviors of ore samples with massive and stockwork texture taken from a metallic ore deposit were determined in a laboratory environment, the differences between these behaviors were revealed and a study was carried out to predict the UCS value in practical ways.

Although the mechanical behaviour of the ore samples taken from the same production face was similar, the low tensile and point load strength values revealed the slight differences between the two samples more apparent. These differences were relatively more pronounced in physical properties such as apparent porosity, P-wave velocity and density. Although they were taken from the same excavation face, it should be considered that formations with different geomechanical properties may exist. However, due to the close agreement of the geomechanical test results, it was observed that massive and stockwork ore can be evaluated together. Nevertheless, the results of polished section, XRD and FE-SEM analyses should be evaluated separately since their mineral contents are quite different.

Within the scope of this study, the average strength conversion factor (k) for all ore samples was calculated as 13.98, and the average strength ratio (R) was calculated as 11.24. These values are generally consistent with those obtained for rocks in the literature. Furthermore, the coefficients obtained from zero-intercept regression analyses ($UCS=13.90 \times PLI$ and $UCS=11.20 \times BTS$) highly concurred with these average ratios, demonstrating the consistency of the results and the high accuracy with which UCS can be estimated using PLI and BTS.

Studies on the determination and analysis of geomechanical properties of metallic minerals are of critical importance for the safe, efficient and economical conduct of mining activities. For this reason, it is of great importance to increase scientific research focusing on the geomechanical characterization of metallic mineral samples.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1, fikrin oluşturulması, tasarımın yapılması, veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi ve yorumlanmasında, literatür taraması ve makalenin yazılmasında; Yazar 2, Literatür taraması, analizlerin gerçekleştirilmesi ve yorumlanmasında; Yazar 3, malzemenin temini, deneylerin yapılması ve yazım formatının düzenlenmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] Karaman K. "Farklı dayanıma sahip kireçtaşlarında dönüşüm faktörünün gözeneklilikle ilişkisi". *3. Bilsel International Aspendos Scientific Researches Congress*, Antalya, Türkiye, 12-13 October 2024.
- [2] Bieniawski ZT. "Engineering classification of jointed rock masses". *Transaction of the South African Institution of Civil Engineers*, 15, 335-344, 1973.
- [3] Kahraman S, Günaydın O, Fener M. "The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Min. Sci. 42, 584-589, 2005.
- [4] Cevizci H, Şentürk A. "Denizli pambesi ve Muğla leylağı mermerlerinin jeomekanik özelliklerin belirlenmesi".

Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26, 99-107 2011.

- [5] Karaman K, Kesimal A. "Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı tahmininde nokta yükü deney yöntemleri ve porozitenin değerlendirilmesi". *Madencilik Maden Muhendisleri Odası Dergisi*, 51(4), 3-14, 2012.
- [6] Karaman K, Kesimal A, Ersoy H. "A comparative assessment of indirect methods for estimating the uniaxial compressive and tensile strength of rocks". *Arabian Journal of Geosciences*, 8(4), 2393-2403, 2015.
- [7] Mallı T, Yetkin ME, Özırat MK, Kahraman B. "Numerical analysis of underground space and pillar design in metalliferous mine". *Journal of African Earth Sciences*, 134, 365-372, 2017.
- [8] Özkan İ, Mesutoğlu M, Kızıtaş Z. "Stress-strain-electrical resistance behavior of Kars-Kağızman rock salt under uniaxial compressive". *12th Regional Rock Mechanics Symposium*, Trabzon, Türkiye, 3-5 October 2018.
- [9] Yetkin ME. "Metalik Madenlerde Topuk Boyutlarındaki Değişimin Gerilme Dağılımına Etkisi". *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 1459-1468, 2022.
- [10] İskender Y. TTK Kozlu ve Üzülmüş Müesseselerindeki Kömür ve Yan Kayacın Jeomekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2024.
- [11] Karaman K, Şahinoğlu E, İskender Y. "Kömür Dayanımının Tahmininde Dönüşüm Faktörü ve Dayanım Oranının Kullanımının Araştırılması". *Türkiye 23. Uluslararası Kömür Kongresi ve Sergisi*, Zonguldak, Türkiye, 12-13 September 2024.
- [12] Luo P, Fang X, Li D, Yu Y, Li H, Cui P, Ma J. "Evaluation of excavation method on point load strength of rocks with poor geological conditions in a deep metal mine". *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 9(90), 2023.
- [13] Karaman K, Kolaylı H. "Effects of Olivine Alteration on Micro-Internal Structure and Geomechanical Properties of Basalts and Strength Prediction in These Rocks," *SUSTAINABILITY*, 16(13), 2024.
- [14] Karaman K, Şahinoğlu E, Alp İ, Kesimal A, Yılmaz AO. "İleri Mikroskopi Yöntemleri ile Parlak Kesit Analizleri," *Nature Sciences*, 12(4), 1-8, 2017.
- [15] Prabhu RS, Priyanka R, Vijay M, Vikashini GRK. "Field emission scanning electron microscopy (Fesem) with a very big future in pharmaceutical research". *International Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, 11(2), 183-187, 2021.
- [16] Temizkalb A. Bilgisayarlı tomografi (μ CT) ve mla (mineral liberation analyzer) verilerinin korelasyonu ve mineral karakterizasyonunda kullanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2023.
- [17] Can NM, Çelik İB. "Proses mineralojisi: cevher hazırlamadaki önemi, ölçüm yöntem ve araçları-Bölüm I.". *Madencilik*, 48(1), 43-53, 2009.
- [18] Tahır OYM, Karaman K. "Dönüşüm faktörünü kullanarak nokta yükü dayanım indeksinden bazaltların tek eksenli

- basınç dayanımının tahmini". *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(4), 1242-1249, 2021.
- [19] ASTM D7012-23. (2023). Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [20] ISRM. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006*, Ulusay, R. and Hudson, J. A. (Editors), 628, Ankara, Turkey, ISRM Turkish National Group, 2007.
- [21] Chen ZL, Shi HZ, Xiong C, He WH, Wang HZ, Wang B, Dubinya N, Ge KO. "Effects of mineralogical composition on uniaxial compressive strengths of sedimentary rocks". *Petroleum Science*, 20(5), 3062-3073, 2023.
- [22] Karaman K, Alp İ, Kesimal A, Yılmaz AO. "Investigation of the Relationships between Compressive Strength and Some Physical Parameters of Pyrite Containing Rocks," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 248-255, 2019.
- [23] Şahin M, Ulusay R, Karakul H. "Point load strength index of half-cut core specimens and correlation with uniaxial compressive strength". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(8), 3745–3760, 2020.
- [24] Sheorey PR. *Empirical Rock Failure Criteria*. Ed. 1, A. A., Balkema, Rotterdam, 1997.
- [25] Ramamurthy T. "Shear Strength Response of Some Geological Materials in Triaxial Compression". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 38, 683–697, 2001.
- [26] Kahraman S, Fener M, Kozman E. "Predicting the Compressive and Tensile Strength of Rocks From Indentation Hardness Index". *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112, 331–339, 2012.