

Çok düşük-orta aşındırıcı kayaların tek eksenli basınç dayanımının Cerchar aşınma indeksi ile tahmini

Estimation of uniaxial compressive strength of very low-medium abrasive rocks from Cerchar abrasiveness index

Ahmet TEYMEN^{1*} 

¹Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye.
ateymen@ohu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 11.09.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 05.12.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 21.11.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.36604
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Kayaç aşındırıcılığının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerin başında Cerchar Aşınma İndeksi (CAI) yer almaktadır. Aşınmayı etkileyen temel parametreler, yoğunluk, çimentolanma derecesi, dayanım özellikleri ve kayaçtaki aşındırıcı minerallerin miktarı gibi özelliklerdir. Bu çalışmada, aşındırıcılık özelliği az-orta düzeyde olan 35 farklı kayaç üzerinde tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve CAI başta olmak üzere 15 farklı test gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan 35 kayaçın UCS değerleri 6.64-148.36 MPa, CAI değerleri 0.68-2.67 arasında değişmektedir. Kayaçların tamamı CAI sınıflamasına göre orta aşındırıcılık kategorisinin altında yer almaktadır. Çalışmanın temel amacı en sık kullanılan kayaç özelliği olarak bilinen UCS değerinin CAI değerleri yardımıyla tahmin edilmesidir. Bu amaçla, CAI ve test edilen diğer parametreler kullanılarak UCS çoklu regresyon yöntemi ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonuçları UCS ile CAI arasında kayda değer ilişkiler olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Cerchar, Aşındırıcılık, Çimentolanma, Dayanım, Kayaç özellikleri.

Abstract

Cerchar Abrasiveness Index (CAI) is one of the commonly used methods for determining rock abrasiveness. The main parameters that affect abrasion are density, cementation, strength properties and amount of abrasive minerals in the rock etc. In this study, 15 different tests including uniaxial compressive strength (UCS) and CAI were performed on 35 different rocks with low-medium abrasive properties. UCS and CAI values of 35 rocks used in the study are ranged between 6.64 to 148.36 MPa and 0.68 to 2.67 respectively. All of the rocks are classified below the medium abrasiveness class according to CAI classification. The main purpose of the study is to estimate the UCS value which is known as the most commonly used rock feature by CAI values. For this purpose, it was tried to estimate UCS values by multiple regression method using CAI and other test parameters. The results of the study show that there are significant relationships between UCS and CAI.

Keywords: Cerchar, Abrasiveness, Cementation, Strength, Rock properties.

1 Giriş

Kayaçların mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, yeraltı yapıları, temeller, şev ve baraj projeleri gibi mühendislik uygulamalarında kayaçların sınıflandırılması için oldukça önem arz etmektedir. Kaya mühendisliği için en yaygın kullanılan parametreler, tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve Elastisite modülüdür (E). Mikro çatlaklar, süreksizlik ve zayıflık içermeyen numuneler kullanılarak standart UCS testlerinden tatmin edici sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca, gerekli karot örnekleri her zaman kırılmış, zayıf ve ince tabakalı kayalardan çıkarılamayabilir. Hassas numune hazırlama ihtiyacı, pahalı bir test cihazına duyulan ihtiyaç ve zaman alıcı bir deney olması, UCS testlerinin dezavantajlı taraflarıdır. Bu nedenlerden dolayı, Schmidt sertlik (SHH), nokta yük dayanım indeksi (I_{s50}), Brazilian dolaylı çekme dayanımı (BTS), P-dalga hızı (V_p), birim hacim ağırlık (UW) gibi bazı indeks ve fiziksel özellikler kullanarak UCS'yi tahmin etmek için birçok araştırmacı tarafından modeller geliştirilmiştir.

Bu testlerin gerçekleştirilmesi nispeten kolaydır, test süreleri kısadır, ucuzdur ve daha az gelişmiş ekipmanlara ihtiyaç duyulur. Öte yandan, bu ekipmanların birçoğu arazide pratik olarak kullanılabilir. Kayaç aşındırıcılığının belirlenmesinde Cerchar Aşınma İndeksi (CAI) değerlerinin ölçülmesi önemli bir

yer tutmaktadır [1]. Kayaçların sertlik ve kazılabilirliklerinin belirlenmesi CAI deneyinin başlıca amaçları olarak tanımlanabilir. CAI deneyi ilk kez 1971 yılında Fransa'da Cerchar Araştırma Enstitüsü'nde geliştirilmiştir [2]. Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) 1987 yılındaki Montreal toplantısında, CAI deneyinin kayaçların kesilebilirliği, delinebilirliği ve kazılabilirliği konularında standart kaya mekaniği deneyi olarak kullanılması önerilmiştir. Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM), 2010 yılında CAI deneyi için bir standart yayınlamıştır [3]. Johnson ve Fowell [4] yaptıkları yerinde ölçmelerle kazı makinelerinde kullanılan keski sarfiyatının kayaçların CAI değerleri ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, aşındırıcı mineraller ve çimentolanma özelliklerine ek olarak, dayanım özelliklerinin de CAI değerleri üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir. West [5] kömür içeren sedimanter kayaçlar üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada, CAI kayaç aşındırıcılığı ile kayacın kuvars içeriği ve Mohs sertlik değeri arasındaki doğru orantılı ilişkileri belirlemiştir. Çopur ve Eskikaya [6] TKİ Eyzek bölgesindeki marınların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemişler ve mekanize yöntemle çalışılabilirlik yönünde bir sınıflama yapmışlardır. Kazı çalışmaları için uygun galeri açma makineleri seçerek bu makinelerin kazı performanslarını tahmin etmişlerdir. CAI deneyleri sonucunda, basınç

*Yazışılan yazar/Corresponding author

dayanımları 31.7 ila 92.2 MPa arasında değişen marnların orta sertlik grubunda yer aldığını belirlemişlerdir. Al-Ameen ve Waller [7], düşük aşındırıcı mineral içeren yüksek dayanımlı bazı kayaların yüksek aşındırıcılık indeksine sahip olabildiklerini, yüksek aşındırıcı mineral içeriğine sahip olan bazı düşük dayanımlı kayaların ise düşük aşındırıcılık indeksine sahip olabildiklerini belirlemişlerdir. Aşındırıcı mineral içeriği ile birlikte çimentolanmanın ve dayanım özelliklerinin, CAI üzerinde etkisi olduğunu bildirmişlerdir. Yaralı ve Avcı [8], Üzülmüş Taşkömürü Müessesesi Asma-Dilaver İşletmesi kömür çevre kayalarının aşındırıcılık özelliklerini araştırmış ve mekanik olarak kesilebilirliklerini yorumlamışlardır. Kayaların aşındırıcılığının tespiti için bir Cerchar aşınma indeks deney düzeneği kurarak kayaların mekanik ve petrografik özellikleriyle CAI değerlerini karşılaştırmışlardır. Petrografik özelliklerle Cerchar aşınma indeksi verileri arasında ilişki kurmuşlar, ortalama kuvars tane boyutu ile CAI arasında üssel bir ilişki elde etmişlerdir.

Yaralı ve Akçın [9] Zonguldak Taşkömürü Havzası kayalarının sertliklerini ve mekanik özelliklerini belirlemek için laboratuvarında bir dizi deney yapmışlardır. Kayaların CAI değerlerinin bulunabilmesi için modifiye edilmiş bir deney düzeneği kullanmışlardır. İki farklı uç açısına sahip matkap uçlarıyla kayaların sertliklerini belirlenmiş ve CAI değerlerine uç açısının etkisini araştırmışlardır. CAI değerleriyle kayaların mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri değerlendirmişlerdir. Yapılacak mekanize kazılarda kullanılacak makinaların performans tahminleri ile keski tüketimlerini daha net olarak belirlemeye çalışmışlardır. Dipova [10], Austin (Teksas, ABD) şehir içi geçiş tüneli kaya örneklerini test ederek zayıf kireçtaşlarının CAI verileri ile dayanım özellikleri arasındaki ilişkileri araştırmıştır. Kayacın aşınma ve aşındırıcılığı bir arada düşünülerek, aşınan çelik üzerindeki ve aynı anda kayada gerçekleşen oyulma (yarık) miktarları birlikte ölçülmüş ve bu iki parametre ilişkilendirilmeye çalışılmıştır.

Sert kayalarda kazıcı ömrünün tahmininde kullanılan CAI yönteminin zayıf kayalar için dayanım özelliklerinin tahmininde kullanılabilirliğine dönük bir araştırma yürütmüştür. Araştırmacı istatistiksel çalışmalar sonucunda CAI ile UCS ve BTS değerleri arasında ilişki olduğunu belirlemiş, CAI ile yarık derinliği (YD) arasında ve YD ile UCS ve BTS değerleri arasında da ilişkilerin olduğunu belirlemiştir. CAI parametresinin ve yöntemin, yumuşak kayalar için geliştirilmesi önermiştir. Yaralı [11], Zonguldak Taşkömür Havzası çevre kayalarının aşındırıcılıkları ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri incelemiştir. Tamamı kumtaşlarından oluşan 29 kömür çevre kayacı üzerinde CAI, Shore sertlik, nokta yükü dayanımı, tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian dolaylı çekme dayanımı deneylerini yapmıştır. Daha sonra, CAI, dayanım ve indeks deney sonuçlarını regresyon analizi yöntemleri ile değerlendirmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre CAI ve tek eksenli basınç dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, Shore sertlik ve nokta yük dayanım indeksi arasında pozitif doğrusal ilişkiler belirlemiştir.

Bu çalışmanın amacı mekanize kazı makinalarında kullanılan keskinin tahmini tüketimlerinin belirlenmesinde kullanılan Cerchar aşınma indeksi (CAI) ve diğer kayaç özellikleri yardımı ile temel mühendislik parametresi olan UCS'nin pratik ve anlamlı şekilde tahmin edilmesine yönelik eşitlikler ortaya koymaktır.

2 Materyal ve metot

2.1 Malzeme özellikleri

Bu çalışmada kullanılan kayalar Türkiye'nin farklı illerindeki fabrikalardan, doğaltaş ocaklarından ve mostralardan toplanmıştır. Laboratuvar deneyleri, 35 farklı kayacın taze kısımlarından alınan blok veya parçalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test edilen kayalar, metamorfik (10), mağmatik (9) ve sedimanter (16) kökenlidir (Şekil 1).



Şekil 1. Test edilen kayaların bir bölümüne ilişkin görseller.

Figure 1. Images of part of the rocks tested.

Kayaç örnekleri makroskopik olarak incelenmiş ve deneylerde süreksizlik içermeyen, alterasyona uğramamış numuneler kullanılmıştır. Karot numunelerinin boyutlandırılması için Brillant 250 kesme makinesi kullanılmıştır. Karot numunelerinin hazırlama aşamasında ISRM [12] test prosedürleri dikkate alınmıştır. Tablo 1'de ISRM [13] tarafından önerilen Cerchar Aşınma İndeksi aşındırıcılık sınıflaması verilmektedir. Kayaların isimleri, kökenleri ve ortalama deney sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Cerchar aşınma indeksi sınıflaması [13].

Table 1. Cerchar abrasion index classification [13].

Sınıflama	CAI değeri
Aşırı yüksek aşındırıcı	≥ 5
Çok yüksek aşındırıcı	4.0-4.9
Yüksek aşındırıcı	3.0-3.9
Orta aşındırıcı	2.0-2.9
Düşük aşındırıcı	1.0-1.9
Çok düşük aşındırıcı	0.5-0.9
Aşırı düşük aşındırıcı	0.1-0.4

2.2 Laboratuvar Deneyleri

Kayaların UCS değerinin CAI ve diğer mühendislik özellikleri ile olan ilişkisini araştırmak için ilgili kayaların fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kaya örnekleri genel olarak ISRM [12] tarafından önerilen kurallara uygun olarak hazırlanmış ve test edilmiştir. Bu kapsamda tek eksenli basınç dayanımı (UCS), Tanjant Elastisite modülü (E_t), Cerchar aşınma indeksi (CAI), Brazilian dolaylı çekme dayanımı (BTS), Schmidt sertliği (SHH), Shore skleroskop sertliği (SSH), Brinnel sertliği (HB), Vickers sertliği (HV), nokta yük dayanımı ($1s_{(50)}$), kayaç dayanım katsayısı (CRS), kayaç darbe sertlik numarası (RIHN), disk makaslama dayanımı (BPI), Kırılabilirlik indeksi (CI), batma sertliği (IHI) ve çatlak dayanımı (K_{IC}) testleri gerçekleştirilmiştir. Ortalama deney sonuçlarının tamamı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan kayalara ait ortalama deney sonuçları.

Table 2. Average test results of the rocks used in the study.

No	Kayaç tipi	Kayaç sınıfı	UCS	BTS	Is ₍₅₀₎	BPI	E _t	CAI	SHH	SSH	HB	HV	IHI	K _{IC}	CRS	RIHN	CI
			MPa				GPa			kg/mm ²		kN/mm	MN/m ^{3/2}	%			
1	Mermer	Metamorfik/Mersin	66.0	6.1	4.6	13.2	17.6	1.61	49.8	51.7	112.9	96.0	13.6	1.60	1.39	33.2	77.1
2	Mermer	Metamorfik/Mersin	56.4	4.5	3.3	9.5	17.6	1.48	45.6	48.6	37.5	26.9	11.5	0.68	1.29	16.1	79.9
3	Serpantin	Metamorfik/Yahyalı	34.4	2.4	3.2	6.1	5.4	1.14	37.2	40.9	89.1	36.3	5.7	0.63	0.87	22.4	81.4
4	Mermer	Metamorfik/Niğde	73.3	6.8	4.2	7.7	20.6	1.90	45.9	48.5	84.0	33.4	8.7	1.05	1.11	13.9	75.7
5	Mermer	Metamorfik/Afyon	64.9	8.1	2.9	11.1	13.8	1.38	46.9	43.4	112.3	33.1	10.5	1.06	0.62	13.7	82.3
6	Serpantin	Metamorfik/Adana	96.8	6.1	4.9	16.1	23.7	1.41	50.2	47.5	87.2	62.1	11.2	0.80	1.60	36.0	76.6
7	Mermer	Metamorfik/Muğla	55.3	5.0	3.0	7.0	17.0	1.70	43.0	42.1	59.3	34.7	8.5	1.20	0.81	18.4	83.1
8	Mermer	Metamorfik/Sivas	46.8	4.4	3.3	9.4	13.2	1.65	43.1	50.5	51.6	46.8	7.8	1.49	1.72	23.0	79.1
9	Mermer	Metamorfik/Mersin	49.3	6.1	3.9	9.7	17.7	1.17	47.1	43.3	76.3	59.3	13.7	0.86	0.75	23.7	72.3
10	Mermer	Metamorfik/Mersin	72.6	5.3	4.3	8.0	17.6	1.85	47.2	40.0	61.9	33.9	9.6	0.90	1.90	33.2	74.8
11	Dünit	Mağmatik/Adana	119.7	8.5	4.9	15.6	24.5	2.57	51.2	59.7	140.3	69.5	15.1	1.07	2.60	41.6	71.1
12	Tüf	Mağmatik/Kayseri	30.3	2.4	1.8	3.5	2.9	1.27	36.5	37.0	18.1	9.3	3.6	0.36	0.70	10.6	82.3
13	Tüf	Mağmatik/Kayseri	28.8	2.6	1.9	4.2	2.9	0.92	22.6	31.8	15.6	19.4	2.7	0.27	0.63	12.6	85.5
14	Tüf	Mağmatik/Kayseri	34.2	4.0	2.3	5.1	3.9	1.40	23.9	40.0	12.0	25.0	6.3	0.58	0.71	11.3	81.4
15	İğnimbirit	Mağmatik/Göreme	6.6	1.1	1.5	1.2	2.0	0.75	16.9	9.2	1.9	7.5	1.1	0.14	0.37	2.9	93.2
16	Tüf	Mağmatik/Nevşehir	25.1	2.7	2.3	5.6	4.2	0.95	22.0	19.2	7.5	11.0	3.1	0.67	0.54	9.8	85.2
17	Tüf	Mağmatik/Ürgüp	35.7	3.4	2.9	5.6	5.9	1.31	26.2	32.0	16.7	30.5	4.2	0.71	0.84	13.0	80.1
18	İğnimbirit	Mağmatik/Nevşehir	6.7	1.3	1.6	2.8	2.1	0.68	22.8	15.9	2.2	11.1	1.2	0.11	0.25	3.1	92.2
19	İğnimbirit	Mağmatik/Nevşehir	14.6	2.2	1.9	3.0	3.3	0.97	17.8	15.1	2.7	9.5	1.2	0.18	0.37	7.0	87.0
20	Kireçtaşı	Sedimanter/Bünyan	140.9	12.5	5.9	21.1	26.2	2.12	49.2	57.7	161.9	126.9	18.5	1.41	3.39	38.9	65.4
21	Traverten	Sedimanter/Burdur	77.3	8.7	3.4	13.1	24.0	1.90	49.8	42.5	132.9	61.1	9.0	1.73	1.53	32.8	81.0
22	Kiltası	Sedimanter/Ankara	79.3	8.4	2.4	12.2	15.0	1.33	35.4	31.4	55.0	30.0	7.1	1.43	1.91	31.7	70.2
23	Kireçtaşı	Sedimanter/Osmaniye	40.9	6.6	3.1	6.8	6.3	1.41	39.2	37.0	88.5	68.7	7.5	0.66	0.88	25.0	77.3
24	Breş	Sedimanter/Adana	78.3	7.9	3.8	6.3	25.3	1.99	51.1	45.0	71.5	96.0	13.6	0.87	1.81	34.2	77.1
25	Kireçtaşı	Sedimanter/Antalya	108.4	6.6	3.8	11.9	23.2	2.16	57.6	51.3	110.1	114.3	14.0	1.31	2.09	40.8	72.5
26	Alçıtaşı	Sedimanter/Niğde	14.0	1.7	1.2	3.1	1.0	0.85	20.0	13.1	14.8	25.1	1.0	0.23	0.29	12.2	85.0
27	Kireçtaşı	Sedimanter/Diyarbakır	133.0	10.1	5.5	18.5	17.0	1.76	58.6	57.3	131.1	122.0	13.7	1.29	2.52	39.1	62.1
28	Kireçtaşı	Sedimanter/Hatay	100.8	10.5	6.8	18.1	22.2	1.55	52.7	55.2	162.1	99.4	10.5	1.35	2.74	46.2	62.5
29	Kireçtaşı	Sedimanter/Bursa	101.3	9.4	4.4	12.1	21.6	1.67	54.3	51.3	125.2	89.6	12.6	1.13	1.54	23.6	73.1
30	Kireçtaşı	Sedimanter/Bilecik	131.6	10.6	5.9	18.2	29.4	1.72	63.1	51.3	192.5	111.8	13.2	1.37	3.20	39.3	64.6
31	Silttaşı	Sedimanter/Adana	148.4	12.9	7.5	19.5	26.6	2.67	53.8	66.5	211.2	145.3	14.6	1.78	3.75	47.9	62.9
32	Traverten	Sedimanter/Denizli	61.0	7.6	3.3	13.3	15.6	1.25	45.5	45.6	102.5	34.0	11.2	0.76	1.32	20.9	80.1
33	Kireçtaşı	Sedimanter/Bursa	122.2	8.8	3.9	17.9	28.1	1.85	49.7	54.1	156.1	111.2	12.2	1.35	2.45	45.5	76.5
34	Kireçtaşı	Sedimanter/Bursa	106.8	8.9	4.9	16.9	21.0	1.47	48.2	50.1	122.4	123.4	10.8	0.98	2.21	41.1	70.1
35	Limra	Sedimanter/Nevşehir	43.9	6.0	2.1	5.6	15.2	1.35	34.1	33.0	31.5	65.2	5.0	0.34	1.00	20.5	78.1

2.2.1 Tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve Tanjant Elastisite modülü (E_t)

Kayaçların Elastisite modülleri ve tek eksenli basınç dayanım testleri 42 mm çapında ve uzunluk / çap oranı 2-2.5 olan karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Blok örneklerden karot alma makinesi ile kesilerek çıkartılan karotların uçları birbirine paralel olarak kesilip düzeltilmiştir. UCS testlerinde 3000 kN kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Yükleme oranı, kaya tamamen deforme olana kadar 1-1.2 MPa/sn arasında sabit tutulmuştur. Ortalama UCS değerleri ve E_t değerleri, beş adet deneyin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Elastisite modülü, karotlar üzerine yerleştirilen deformasyon algılayıcılardan elde edilen birim deformasyon değerleri ve gerilme değerleri kullanılarak çizilen eksenel gerilme-birim deformasyon eğrileri yardımı ile hesaplanmıştır.

2.2.2 Brazilian dolaylı çekme dayanımı (BTS)

Kayaçların çekme gerilmelerine karşı direncini belirlemek için yaygın olarak uygulanan BTS testi kullanılmıştır. Her kayaç türü için 54 mm çapında ve 27 mm kalınlığında en az yedi karot numunesi kullanılmış ve test ISRM [12] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yük, kayaç 5 dk. içerisinde yenilecek şekilde sabit bir hızda sürekli olarak uygulanmıştır.

2.2.3 Nokta yük dayanım indeksi (I_{s50})

Nokta yükleme deneyi eksenel ve çapsal olarak iki doğrultuda da yapılabilmektedir. Nokta yük dayanımı için 42 mm çapında ve yaklaşık 50 mm boyunda karot numuneleri hazırlanmıştır. Deneyler, standart nokta yük dayanım indeksi deney cihazında ve çapsal yükleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, düzeltilmiş nokta yükü dayanım indeksi, I_{s(50)}, şeklinde verilmiştir.

2.2.4 Cerchar aşınma indeksi (CAI)

Cerchar aşınma deneyinde standart Cerchar test aleti kullanılmıştır. Deneyde kullanılan çelik uçlar Rockwell HRC 43 sertliğe, 2000 MPa çekme dayanımına ve 90° tepe açısına sahiptir. Bu konik şekilli çelik uç 70 N bastırma kuvveti ile kaya numunesi yüzeyi üzerinde 1 mm/s hızla 10 mm boyunca çekilmiş ve ucun tepesinde oluşan aşınma yüzeyinin boyutu ölçülmüştür. Aşınma ölçümleri 42-54 mm arası çapa, 30-50 mm arası boya sahip karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Karotlar kaba kesme makinesinde kesilmiştir ve yüzeylerine özellikle zımparalama işlemi uygulanmamıştır. Aşınma işleminin uygulanacağı yüzeyin tamamen parlatılması durumunda çelik uç kayaca batmamakta ve yüzey boyunca kolayca kaymaktadır. Bu durum sağlıklı bir ölçümü olanaksız hale getirmektedir. Çelik uçlarda meydana gelen aşınma

miktarını standart bir şekilde görüntülemek amacıyla yüksek çözünürlüklü bir fotoğraf makinası kullanılarak bir düzenek hazırlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Aşınma deneyinde kullanılan CAI düzeneği.

Figure 2. CAI apparatus used in the abrasion test.



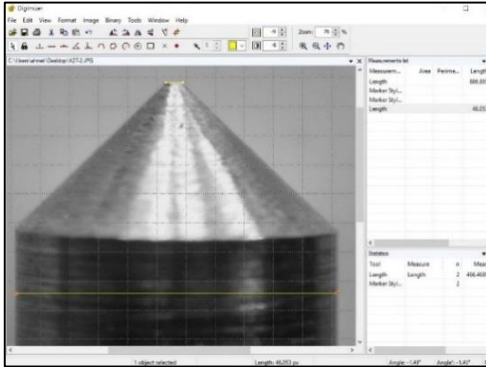
Şekil 3. CAI testlerinde kullanılan uçların yüksek çözünürlükte fotoğraflanması.

Figure 3. High resolution photographing of pins used in CAI tests.

Çekilen fotoğraflar üzerindeki ölçümler kalibre edilmiş bir dijital kumpas programı (Digimizer) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Çelik uçta meydana gelen 1/10 mm'lik bir aşınma yüzeyi bir birim Cerchar Aşınma İndeksi olarak kabul edilir ve birimsiz olarak kullanılır (Eşitlik 1).

$$CAI = 10 * (d/c) \quad (1)$$

- CAI : Cerchar Aşınma İndeksi,
d : Aşınma düzlüğünün çapı (mm)
c : Birim düzeltme faktörü (c = 1 mm).



Şekil 4. Bilgisayar programı (Ekran kumpası) yardımı ile çelik uç üzerindeki aşınmanın ölçümü.

Figure 4. Measurement of abrasivity on the steel pin by a computer program (Screen caliper).

2.2.5 Schmidt sertlik deneyi (SHH)

Kayaçların sertlik ve mukavemetini belirlemek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri de SHH yöntemidir. SHH için N-tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. Ölçümler, kaya bloklarının düzgün yüzeylerinden gerçekleştirilmiştir. Blok yüzeylerine 20 vuruş uygulanmış ve en yüksek 10 değer ortalaması hesaplanmıştır. Ölçülen SHH değerlerini düzeltmek için bir düzeltme faktörü (örs örtme değeri/örs üzerinde alınan ortalama 10 okuma) kullanılmıştır.

2.2.6 Brinell sertlik deneyi (HB)

HB, metaller için yaygın olarak kullanılan bir test yöntemidir, ancak kırılma doğası nedeniyle kayaçlar için genellikle tercih edilmez. Bu, batmaya karşı kaya direncinin bir ölçüsüdür ve uygulanan kuvvet ile doğrudan ilişkilidir. Kalınlığı 30 mm ve çapı 42mm olan karotların uçları kesilip birbirine paralel olarak düzleştirilmiştir. HB testleri, kayaç örneği ile temas halinde olan 10 mm çapında küresel bir çelik bilye ile gerçekleştirilmiştir. Kaya yüzeylerine 50 kg'dan 3000 kg'a kadar olan yükler standart süreyle (30 sn.) uygulanmış ve batma alanının çapı ölçülmüştür. Sertlik değeri, uygulanan yükün batma yüzey alanına oranından tespit edilmiş ve kg / mm² birimi ile ifade edilmiştir. HB değerleri, üç deneyin ortalaması kullanılarak hesaplanmıştır.

2.2.7 Vickers sertlik deneyi (HV)

Diğer sertlik testlerine kıyasla daha pratik olan HV testi, HB metoduna bir alternatif olarak Smith ve Sandland [14] tarafından geliştirilmiştir. Testin basitliği, hesaplamaların, batma ucunun boyutundan bağımsız olması ve uygulanan malzemenin sertliğinin önemsiz olmasından kaynaklanmaktadır. Deneyde, farklı kayaçlar için kullanılabilen geniş ölçekli HV test cihazı (Mitutoyo) kullanılmıştır. Hazırlanan kayaç örneklerine 1 ila 50 kg arasında değişen yükler 10-15 sn. süreyle uygulanmıştır. Kayaç yüzeyinde kalan izin iki köşegen değeri bir mikroskop ile ölçülmüş ve bu iki değer ortalaması hesaplanmıştır. HV değeri, yükün (kgf) hesaplanan alana (mm²) bölünmesi ile hesaplanmıştır.

2.2.8 Batma sertliği (IHI)

IHI testlerini gerçekleştirmek için yükleme sistemi 30 kN kapasiteli, ISRM [12] test prosedürlerine uygun bir nokta yük test aleti kullanılmıştır. Bu cihaz, 60° koni ve 5 mm yarıçapa sahip küresel uçlu bir konik levhaya sahiptir. Deney için, yüksek mukavemetli reçine ile çelik bir çerçeveye yerleştirilen pürüzsüz karot numuneleri (42 mm çap ve 30 mm kalınlık) kullanılmıştır. Nokta yük cihazına penetrasyon ölçümü için manuel bir dial gauge takılmıştır. Disk örnekleri 20 kN'a kadar yüklenmiştir. Göstergeden okunan penetrasyon değerleri her kayaç için üç kez tekrarlanmıştır. Kayaçların IHI değerleri, azami yükü maksimum nüfuz değerlerine (mm) bölmek suretiyle hesaplanmıştır.

2.2.9 Shore skleroskop sertliği (SSH)

SSH, herhangi bir kayacın yüzey sertliğini elastiklik açısından ölçen bir yöntemdir. Bu test, mineraloji, sedimentasyon ve elastikiyetten etkilenen matkaplara ilişkin ampirik denklemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [15],[16]. Bu çalışmada kullanılan kayaçların SSH'sini ölçmek için C-2 modeli tahribatsız ölçüm cihazı kullanılmıştır. Test, kızak içerisine yerleştirilmiş 14 cm² yüzey alanına ve 2 cm kalınlığa sahip kaya örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Karotların üst yüzeyleri zımparalanmış ve elmas uç kayaç örneğinin yüzeyine 30 cm yükseklikten dikey yönde düşürülmüştür. Ölçümler, en az

5 mm'lik aralıklarla 20 kez tekrarlanmış ve en yüksek on ölçüm sonucunun ortalaması alınmıştır.

2.2.10 Kayaç dayanım katsayısı (CRS)

CRS değeri darbeleri matkapların ilerleme oranını hesaplamak için çalışma havası basıncı ile birlikte kullanılabilir. CRS, Protodyakonov testinin bir başka bir versiyonudur ve enerji/birim hacim açısından parçalanmaya karşı direnci ölçer. Test, -25.4 mm +19.1 mm elek aralığından seçilen iki agrega parçasına 63.5 cm'lik bir yükseklikten 2.4 kg'lık bir ağırlık düşürülerek gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, aynı kayaç için farklı darbe sayıları kullanılarak beş kez tekrarlanmıştır. Ezilmiş agrega parçaları, 500 mikron kare gözlü elekten elenmiş ve beş deneyden hesaplanan en küçük değer o kayaçın CRS değeri olarak kabul edilmiştir.

2.2.11 Disk makaslama dayanımı (BPI)

Deney, disk makaslama deney aparatı ve nokta yük dayanım aleti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 54 mm çapa ve 10 mm kalınlığa sahip karot numuneleri iki noktadan makaslanacak şekilde yüklenmiştir. BPI değerleri, okunan kırılma yükleri ve çap değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

2.2.12 Kayaç darbe sertlik numarası (RIHN)

Bu deney Protodyakonov darbe testinin başka bir versiyonudur. Deney, istenilen oranda ince tane üretmek için gerekli enerji miktarı açısından parçalanma direncini ölçer. Shore sertliği, çalışma hava basıncı ve RIHN değerleri darbeleri delik delme makinelerinin delme hızlarını hesaplamak için kullanılabilir. Deney için 25.4 cm³ hacme sahip karot numuneler hazırlanmıştır. Karot numunelerinin üzerine 63.5 cm'lik bir yükseklikten 2.4 kg'lık bir ağırlık düşürülmüştür. RIHN değeri, 0.5 mm'lik elekten geçen ve orijinal kütlenin %25'ine neden olan darbe sayısıdır.

2.2.13 Kırılabilirlik indeksi (CI)

Kırılabilirlik indeksi deneyi, agrega parçalarının çeneli kırıcı içerisinde maruz kaldığı kuvvetler sonucu kırılmaya karşı gösterdiği direnci dolaylı yoldan belirleyen bir deney yöntemidir. Deneylerde -10+5 mm tane boyutuna sahip 500 g etüv kuruşu agrega kullanılmıştır. Numuneler sabit bir çıkış (5mm) açıklığında tutulan çeneli kırıcıya beslenmiştir. Kırılan malzeme 5 mm boyutundaki elekten elenerek terazide tartılmıştır. Elek altındaki malzeme ilk ağırlığa bölünerek kırılabilirlik indeksi değeri (CI) hesaplanmıştır.

2.2.14 Kırılma tokluğu (K_{IC})

Kırılma tokluğu, kırılma mekanizmasında çatlak oluşumu ve gelişimi gibi kırılma direncine karşı kayaç direncini gösteren temel parametrelerden biridir. Bir malzemenin kırılma tokluğu, onun çatlak gelişimine karşı direncini veya yeni yüzey alanları oluşturmak için gerekli kırılma enerjisi tüketim hızını ifade eder. Kaya mühendisliğinde önemli ve faydalı bir parametre olarak gösterilmektedir [17]. Yüksek kırılma tokluğu, çatlak yayılımına karşı kırılma direncinin arttığını göstermektedir. Bu çalışma kapsamında Chong and Kuruppu [18] tarafından önerilen yarı-dairesel eğilme yöntemi kullanılmıştır. Deneyler için 20 mm yarıçapa (r), 10mm kalınlığa (t) ve 10mm yarıçap uzunluğuna (a) sahip yarıçap daire şeklindeki karot örnekleri kullanılmıştır. K_{IC} değerleri Chong and Kuruppu [19] tarafından önerilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

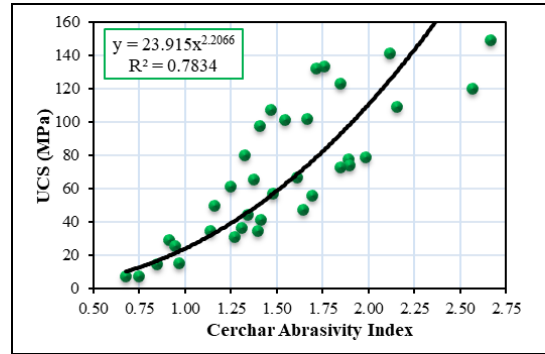
$$K_{IC} = \frac{P_{max}\sqrt{\pi \cdot a}}{2 \cdot r \cdot t} \times Y_I \quad (2)$$

Burada; K_{IC}= kırılma tokluğu (MN/m^{3/2}), P_{max}= kırılma yükü (MN), a = Çentik (yarık) derinliği (m), r= disk örnek yüksekliği (m), t =disk kalınlığı (m) ve Y_I= gerilme yoğunluk faktörüdür.

3 İstatistiksel analiz ve sonuçlar

Kayaç özellikleri arasındaki ilişkileri modellemek için basit ve çoklu regresyon analizleri sıkça kullanılmaktadır. Durbin-Watson, VIF (Çoklu doğrusallık), F ve t-testlerini de kapsayan tüm istatistiksel analizler için SPSS v.17.0 bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı ile Cerchar aşınma indeksi arasında (Şekil 5) üs fonksiyonlu bir ilişki tespit edilmiş ve elde edilen korelasyona ait denklem Eşitlik 3'te verilmiştir. UCS ve mekanik-indeks özellikler arasında da basit korelasyonlar belirlenmiştir. Tablo 2'deki veriler kullanılarak çizilen ve en yüksek determinasyon katsayısını sağlayan üs ve üstel denklemler Tablo 3'te özetlenmiştir. Analizlerin ikinci ve en önemli aşamasında detayları Tablo 4-5'te özetlenen bir dizi çoklu regresyon analizi yapılmıştır.

$$UCS = 23.915 \times CAI^{2.2066} \quad (R^2=0.78) \quad (3)$$



Şekil 5. CAI ve UCS arasındaki korelasyon grafiği.

Figure 5. Correlation graph between CAI and UCS.

Tablo 3. UCS'nin CAI dışındaki diğer özellikler ile elde edilen korelasyon denklemleri.

Table 3. Correlation equations of the UCS obtained with the other features outside the CAI.

Değişken	Denklem	Model	R ²
BTS	UCS= 0.726BTS ^{0.41}	Üs	0.696
IS ₅₀	UCS= 0.727IS ₅₀ ^{0.58}	Üs	0.635
BPI	UCS= 0.669BPI ^{0.36}	Üs	0.577
E	UCS= 0.715E ^{0.29}	Üs	0.704
SHH	UCS= 0.105SHH ^{0.72}	Üs	0.674
SSH	UCS= 0.624e ^{0.02SSH}	Üstel	0.766
HB	UCS= 0.658e ^{0.202HB}	Üstel	0.653
HV	UCS= 0.48HV ^{0.29}	Üs	0.589
IHI	UCS= 0.751IHI ^{0.33}	Üs	0.724
K _{IC}	UCS= 1.601K _{IC} ^{0.37}	Üs	0.698
CRS	UCS= 1.355CRS ^{0.39}	Üs	0.743
RIHN	UCS= 0.475RIHN ^{0.37}	Üs	0.657
CI	UCS= 14.59e ^{-0.03CI}	Üstel	0.532

UCS'nin tahmin edilebilmesi için yapılan çoklu regresyon çalışmalarında, CAI değerinin her eşitlikte sabit bağımsız değişken olması koşuluyla ortalama sonuçları Tablo 2'de özetlenen farklı deneysel veriler kullanılmıştır.

Bağımsız değişken sayısı iki ve üç olan regresyon analizleri yapılmıştır. UCS'yi tahmin etmek için, istatistiksel analizle elde edilebilen en güvenilir ve anlamlı çoklu regresyon denklemleri, determinasyon katsayıları, Durbin-Watson istatistikleri, VIF değerleri, F değerleri ve t değerleri Tablo 4-5'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Tek eksenli basınç dayanımının tahminine ilişkin çoklu denklemler (2 bağımsız değişken).

Table 4. Multiple equations for estimating uniaxial compressive strength (2 independent variables).

Eşitlik no	Regresyon denklemleri	Düzeltilmiş (R ²)	F	VIF	Sig _{VIF}	t _{min.}	Sig _{t _{min.}}	Durbin-Watson
1	UCS= 25.369CAI + 2.987E - 15.344	0.82	76	2.9	0.35	1.37	0.18	0.74
2	UCS= 25.948CAI + 8.8285BTS - 26.218	0.88	125	2.3	0.43	3.12	0.00	1.14
3	UCS= 32.996CAI + 15.908Is ₍₅₀₎ - 38.926	0.83	84	2.2	0.46	3.99	0.00	1.37
4	UCS= 28.988CAI + 1.963RIHN - 24.942	0.84	91	2.4	0.42	2.56	0.02	1.41
5	UCS= 18.007CAI + 33.597CRS - 8.246	0.89	134	2.7	0.37	0.93	0.36	1.96
6	UCS= 31.917CAI + 1.589SSH - 45.993	0.75	53	3.3	0.31	2.39	0.02	0.76
7	UCS= 35.060CAI + 1.739SHH - 56.961	0.79	65	2.4	0.42	3.30	0.00	0.94
8	UCS= 31.337CAI + 4.979BPI - 29.934	0.94	255	1.8	0.55	5.00	0.00	1.83
9	UCS= 29.918CAI + 0.449HB - 13.403	0.86	104	2.2	0.46	1.38	0.18	1.48
10	UCS= 31.151CAI + 5.028IHI - 23.66	0.79	64	2.7	0.37	2.06	0.05	0.99
11	UCS= 47.697CAI + 31.041K _{IC} - 32.404	0.71	43	2.4	0.42	2.50	0.02	1.01
12	UCS= 35.633CAI - 3.075CI + 251.752	0.85	97	1.9	0.52	4.44	0.00	1.31
13	UCS= 35.841CAI + 0.579HV - 20.114	0.84	89	2.0	0.51	2.00	0.05	1.30

Tablo 5. Tek eksenli basınç dayanımının tahminine ilişkin çoklu denklemler (3 bağımsız değişken).

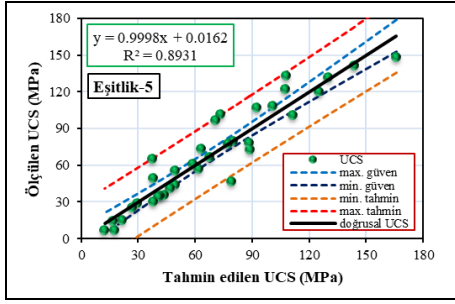
Table 5. Multiple equations for estimating uniaxial compressive strength (3 independent variables).

Eşitlik No	Regresyon Denklemleri	Düzeltilmiş (R ²)	F	VIF _{max.}	Sig _{VIF_{max.}}	t _{min.}	Sig _{t _{min.}}	Durbin-Watson
14	UCS= 21.878CAI + 0.278HV + 6.301BTS - 20.648	0.90	103	4.1	0.25	2.61	0.01	1.19
15	UCS= 26.482CAI + 0.367HV + 9.253Is ₍₅₀₎ - 26.789	0.87	76	3.7	0.27	2.87	0.01	1.51
16	UCS= 26.615CAI + 0.324HV + 1.151RIHN - 20.064	0.86	72	5.3	0.19	2.16	0.04	1.50
17	UCS= 22.468CAI + 0.487HV + 0.764SSH - 26.191	0.85	66	4.1	0.25	1.97	0.06	1.36
18	UCS= 24.578CAI + 0.442HV + 0.941SHH - 34.045	0.86	72	3.3	0.31	2.59	0.01	1.43
19	UCS= 26.983CAI + 0.179HV + 4.149BPI - 25.47	0.95	197	3.6	0.28	2.39	0.02	1.88
20	UCS= 28.040CAI + 0.333HV - 1.968CI + 158.144	0.88	85	3.4	0.30	3.09	0.00	1.29
21	UCS= 29.573CAI - 2.034CI + 7.522Is ₍₅₀₎ + 153.435	0.86	72	5.1	0.20	1.97	0.06	1.38
22	UCS= 25.307CAI - 1.906CI + 1.107RIHN + 149.239	0.88	82	4.5	0.22	2.70	0.01	1.44
23	UCS= 18.345CAI - 1.286CI + 23.968CRS + 104.595	0.90	101	6.2	0.16	1.99	0.06	1.94
24	UCS= 25.784CAI - 2.399CI + 0.846SHH + 179.132	0.87	75	3.4	0.29	2.32	0.03	1.19
25	UCS= 22.874CAI - 1.868CI + 0.29HB + 154.334	0.90	104	3.4	0.29	3.18	0.00	1.66
26	UCS= 23.108CAI - 2.411CI + 2.527IHI + 196.863	0.87	77	3.8	0.27	2.44	0.02	1.27
27	UCS= 16.866CAI + 6.846BTS + 1.25E - 19.019	0.89	95	4.8	0.21	1.99	0.06	0.89
28	UCS= 20.206CAI + 6.506BTS + 7.321Is ₍₅₀₎ - 29.375	0.90	100	4.0	0.25	2.59	0.01	1.20
29	UCS= 16.298CAI + 6.25BTS + 1.06RIHN - 22.146	0.91	118	3.6	0.27	2.25	0.03	1.42
30	UCS= 19.332CAI + 7.305BTS + 0.691SHH - 35.362	0.89	93	3.5	0.29	2.05	0.05	0.90
31	UCS= 22.622CAI + 5.835BTS + 0.203HB - 18.9	0.89	94	6.1	0.16	2.14	0.04	1.32
32	UCS= 21.835CAI + 9.181Is ₍₅₀₎ + 1.267RIHN - 29.69	0.87	78	4.0	0.25	2.56	0.02	1.65
33	UCS= 24.338CAI + 11.819Is ₍₅₀₎ + 0.885SHH - 47.873	0.85	64	3.6	0.28	2.21	0.04	1.34
34	UCS= 21.999CAI + 11.901Is ₍₅₀₎ + 2.579IHI - 30.851	0.85	65	4.0	0.25	2.22	0.03	1.35
35	UCS= 23.101CAI + 3.784BPI + 11.229CRS - 21.751	0.95	196	7.4	0.14	2.36	0.03	2.26
36	UCS= 37.012CAI + 5.558BPI - 13.497K _{IC} - 32.022	0.94	188	3.6	0.28	2.02	0.05	1.83
37	UCS= 20.806CAI + 1.504RIHN + 0.864SHH - 36.93	0.86	71	3.5	0.29	2.24	0.03	1.33

İki bağımsız değişkenin kullanıldığı çoklu regresyon denklemlerinde F_{tablo} değeri 3.30, t_{tablo} değeri ise 2.037'dir. Üç bağımsız değişkenin kullanıldığı çoklu regresyon denklemlerinde F_{tablo} değeri 2.91, t_{tablo} değeri ise 2.040'tur. Elde edilen çoklu regresyon denklemlerinin geçerliliğini kontrol etmek için % 95 güven aralığında F ve t-testleri kullanılmıştır. t-testi, denklemlerin R değerlerinin önem seviyesini belirlemek için kullanılır. Doğrulamanın daha güçlü olabilmesi için çoklu doğrusallık problemi olup olmadığı da incelenmiştir. Çoklu doğrusallık probleminin göstergesi, 10'dan az olması gereken varyans enflasyon faktörü (VIF) ve 0.2'den büyük olması gereken tolerans istatistik (Sig_{VIF}) değeridir. Bu değer 10'dan büyük olması o parametrenin (gözden kaçmış) bir başka grup ile arasında korelasyon olduğunun bir göstergesidir. Eşitlik 23 dışında hiçbir denklemden çoklu doğrusallık problemi söz

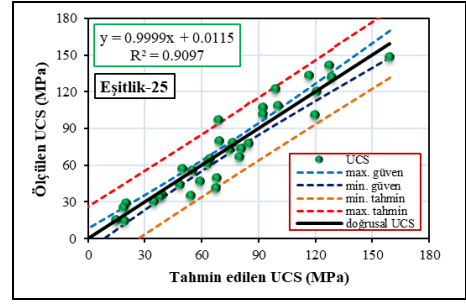
konusu değildir. Yani tahmin değişkenleri arasında mükemmel doğrusal ilişkiden söz edilemez. Çoklu regresyonlarda en yüksek determinasyon katsayısına sahip bazı denklemleri görmek için gözlemlenen ve tahmin edilen UCS dağılım diyagramları, çizilmiştir (Şekil 6-14). Dağılım grafikleri, %95 güven aralığına göre hesaplanan maksimum ve minimum güven aralığı çizgilerinin yanı sıra, maksimum ve minimum tahmin çizgilerini de içermektedir. Noktaların her iki bölgede diyagonal çizgiye eşit olarak dağıldığı gerçeği, modellerin güvenilirliğini güçlendirmektedir.

Tablo 4 ve 5'te Sig_{|t|_{min.}} değerleri incelendiğinde (Sig_{|t|_{min.}} < 0.05 olmalı) Eşitlik 1, 5 ve 9'da verilen denklemlerdeki modellerin geçerliliğinde kısmen bir problem olduğu söylenebilir.



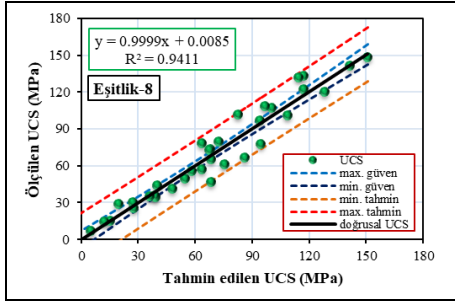
Şekil 6. Ölçülen (UCS_{δ}) ve tahmin edilen (UCS_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 5).

Figure 6. Comparison of measured (UCS_{δ}) and predicted (UCS_T) values (Equation 5).



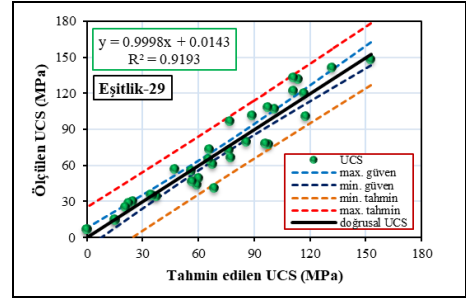
Şekil 10. Ölçülen (UCS_{δ}) ve tahmin edilen (UCS_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 25).

Figure 10. Comparison of measured (UCS_{δ}) and predicted (UCS_T) values (Equation 25).



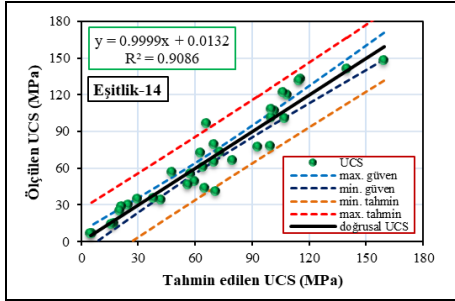
Şekil 7. Ölçülen (UCS_{δ}) ve tahmin edilen (UCS_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 8).

Figure 7. Comparison of measured (UCS_{δ}) and predicted (UCS_T) values (Equation 8).



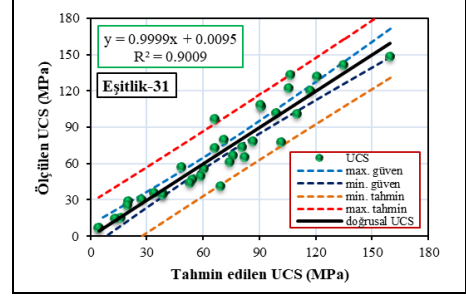
Şekil 11. Ölçülen (UCS_{δ}) ve tahmin edilen (UCS_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 29).

Figure 11. Comparison of measured (UCS_{δ}) and predicted (UCS_T) values (Equation 29).



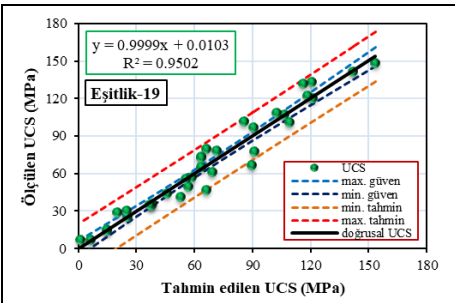
Şekil 8. Ölçülen (UCS_{δ}) ve tahmin edilen (UCS_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 14).

Figure 8. Comparison of measured (UCS_{δ}) and predicted (UCS_T) values (Equation 14).



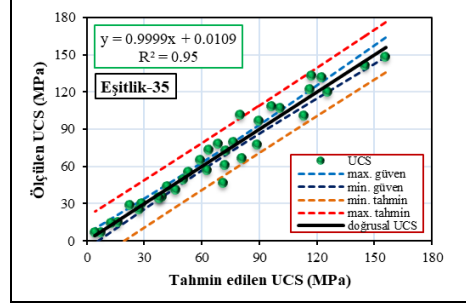
Şekil 12. Ölçülen (UCS_{δ}) ve tahmin edilen (UCS_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 31).

Figure 12. Comparison of measured (UCS_{δ}) and predicted (UCS_T) values (Equation 31).



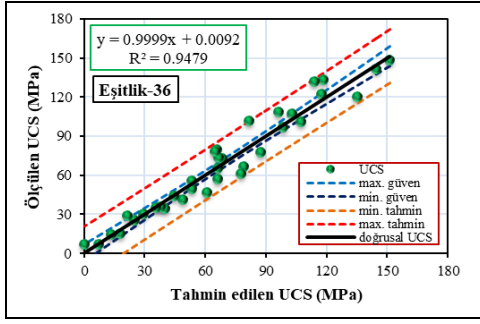
Şekil 9. Ölçülen (UCS_{δ}) ve tahmin edilen (UCS_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 19).

Figure 9. Comparison of measured (UCS_{δ}) and predicted (UCS_T) values (Equation 19).



Şekil 13. Ölçülen (UCS_{δ}) ve tahmin edilen (UCS_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 35).

Figure 13. Comparison of measured (UCS_{δ}) and predicted (UCS_T) values (Equation 35).



Şekil 14. Ölçülen (UCS_0) ve tahmin edilen (UCS_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 36).

Figure 14. Comparison of measured (UCS_0) and predicted (UCS_T) values (Equation 36).

Yüksek determinasyon katsayısına sahip olmalarına rağmen, kurulan modellerde bazı şüpheler söz konusudur. Bu problem 1, 5 ve 9 No.lu denklemler kadar olmasa da kısmen 17, 21, 23 ve 27 No.lu eşitlikler için de söz konusudur. Regresyonların önemini belirlemek için t-testine ek olarak, %95 güven düzeyinde regresyon varyans analizi (F-testi) kullanılmıştır. Toplam 37 çoklu regresyon denkleminin tamamında hesaplanan F değerleri, F_{tablo} değerlerinden önemli derecede yüksektir. Dolayısı ile tüm denklemler, F testi açısından anlamlıdır. Eşitliklere ayrıca Durbin-Watson test istatistiği uygulanmıştır. Bir regresyon modeli tahmin edildikten sonra artık (hata) terimlerinin korelasyon halinde olup olmadığını test etmeye yarayan ve 0 ile 4 arasında bir değere sahip bir test istatistiği olarak ifade edilebilir. Temel bir kural olarak, test istatistiği değerlerinin 1.5 ile 2.5 aralığında olması denklemlerin otokorelasyon açısından nispeten normal olduğu anlamına gelir. Eşitlik 5, 8, 15, 19, 23, 25, 32, 35 ve 36'nın Durbin-Watson test istatistiği bakımından en güvenilir eşitlikler olduğu söylenebilir. Denklemlerin önemi, F ve t testleri ile teyit edildiğinden, tahmin amaçlı olarak güvenilir bir şekilde kullanılabilirler.

Çoklu regresyon analizlerinden elde edilen eşitlikler ve bunlara ait güvenilirlik analizleri detaylı olarak incelendiğinde UCS'nin tahmininde CAI değerleri ile birlikte kullanılan, en güvenilir sonuçları ve yüksek determinasyon katsayılarını veren başlıca testlerin BPI, CRS, BTS, HV ve HB testleri olduğu görülmektedir.

Diğer parametrelerle de önemli regresyon denklemleri elde edilmiştir. Ayrıntılı analizler, çoklu denklemlerin önemli bir bölümünün kayaç dayanımının tahmini için kullanılabilmesini göstermiştir. Çoklu regresyon denklemlerinde birden fazla bağımsız değişken modele girdiğinden, tahmin yetenekleri ve determinasyon katsayıları basit modellerden daha güçlüdür.

Çalışma kapsamında son olarak, çoklu regresyon analizlerinden elde edilen tahmin değerleri ve ölçülen değerlerin normal dağılıma sahip olup olmadığı incelenmiştir. Normal dağılıma karar verilirken 5 ana parametre dikkate alınmıştır. Bunlar histogram grafikleri, varyasyon katsayısı, basıklık-çarpıklık, Q-Q dağılım grafiği ve Kolmogorov-Simirnov normallik testi. Kolmogorov-Simirnov Z normallik testine göre ölçülen UCS değerleri de dâhil olmak üzere toplam 38 grubun Sig. değeri $0.2 > 0.05$ olduğundan grupların normal dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Normal dağılım incelemesinden sonra ölçülen ve tahmin edilen UCS değerlerinin varyasyonları, tek yönlü varyans analizi (Anova) kullanılarak test edilmiş ve homojen olduğu görülmüştür (Levene istatistiği = 0.087 ve Sig. Seviyesi= 1). Eğer Sig. seviyesi 1 ise, varyansın homojenliği

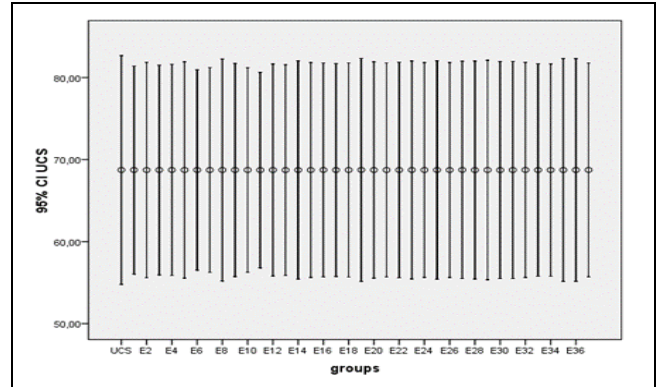
mükemmeldir. Anova test sonuçlarına göre grupların ortalama değerleri ($F = 0$ ve Sig. Seviyesi= 1) arasında fark bulunmamıştır (Tablo 6).

Tablo 6. Anova çizelgesi.

Table 6. Anova chart.

	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
Guruplar Arası	0.027	37	0.001	0.00	1.00
Gurup İçi	1872186	1292	1449		
Toplam	1872186	1329			

Ölçülen ve hesaplanan UCS değerleri arasındaki ilişkileri karşılaştırmak için, ölçülen UCS'nin kontrol grubu olarak alındığı Dunnett çift taraflı T testi kullanılmıştır. Post-hoc testlerde kullanılacak önem değeri (Sig.) karşılaştırılan toplam grup sayısına göre revize edilmelidir. 38 grubun karşılaştırıldığı bu çalışma için Sig. değeri 0.000035 olarak hesaplanmıştır. Analiz sonucunda görülmüştür ki, her veri çifti çok yakın bir ortalama farkına, eşit standart hataya ve Dunnett çift taraflı T testine dayanan belirginlik seviyesine sahiptir (Şekil 15). Kayaç malzemelerinin UCS'sinin, korelasyon ve Anova analiz sonuçları dikkate alındığında, herhangi bir eşitlikten güvenilir bir şekilde tahmin edilebileceği sonucuna varılabilir. Korelasyon ve Anova analizlerine ek olarak, ölçülen ve tahmini UCS arasındaki yüzde hataları değerlendirilmiştir. Bunlar, yüzde olarak ifade edilen nispi hatalardır. Burada nispi hata, ölçülen değer büyüklüğüne bölünen mutlak hata olarak hesaplanır. Mutlak hata, ölçülen değer ile tahmini değer arasındaki farkın büyüklüğüdür. Yüzde hata analizine göre Denklem 32, 44 örnek için $\leq 10\%$, örneklerin %47.3'ünde bir hata değeri ile sonuçlanırken, Denklem 19 yalnızca 20 örnek için $\leq 10\%$ hata değeriyle sonuçlanmıştır (Numunelerin %57.1'i).



Şekil 15. Farklı yöntemlerden elde edilen ortalama UCS değerlerinin karşılaştırılması.

Figure 15. Comparison of average UCS values obtained from different methods.

Tüm tahmin modellerin kapasite performanslarını karşılaştırmak amacıyla aşağıda verilen formüllere göre bazı istatistiksel performans endeksleri (RSR, WMAPE, VAF ve Adj.R²) her model için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$PI_{at1} = \left[ADJ.R^2 + \left(\frac{VAF}{100} \right) - RSR - WMAPE \right] \quad (3)$$

$$Adj.R^2 = 1 - \frac{(n-1)}{(n-p-1)} (1-R^2) \quad (4)$$

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(t_i - o_i)}{\text{var}(t_i)} \right] \cdot 100 \quad (5)$$

$$WMAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{t_i - o_i}{t_i} \right|}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (6)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2}} \quad (7)$$

Burada t deneysel çalışmalardan elde edilen değerler, o tahmin modellerinden elde edilen çıkış değerleridir. \bar{t}_i deneysel çalışmaların aritmetik ortalaması, \bar{o}_i tahmin modellerinin aritmetik ortalamasıdır. var varyans, n veri sayısı, p ise modele giren değişken sayısını belirtir. PI_{at1} bu çalışma kapsamında tarafımdan geliştirilmiş olan performans indeksi değeridir. VAF varyans hesap faktörü, $WMAPE$ tahminin ağırlıklı ortalama mutlak yüzde hatası, $Adj.R^2$ düzeltilmiş determinasyon katsayısıdır. RSR , tahmin değerlerinin standart sapma oranına göre kök kare hata oranıdır.

Bağımsız değişkenleri tahmin etmek için daha doğru modeli seçmek oldukça zordur. Esasen, modellerin doğruluğu $WMAPE$, VAF , $RMSE$, RSR ve R^2 gibi performans indekslerini ayrı ayrı kullanarak incelenebilir ancak, bu endekslerden biri diğerlerinden üstün değildir. Bu performans indekslerinden dört tanesi aynı formülde birleştirilmiş ve geliştirilmiş modellerin performanslarını karşılaştırmak için Eşitlik 3'te verilen performans indeksi hesaplanmıştır. Teorik olarak bir modelin mükemmel sayılabilmesi için Adjusted R^2 değerinin "1", VAF değerinin "100", $WMAPE$ değerinin "0" ve RSR değerinin "0" olması gerekir. Teorik olarak, mükemmel tahmin modellerinin PI_{at1} değeri beklendiği gibi 2'ye eşittir. Buradan hareketle en yüksek ortalama PI_{at} değerine sahip model en güvenilir ve doğru olanı olmalıdır. Her model için hesaplanan PI_{at} değerlerine göre 37 denklem arasında en güvenilir sonuçları sağlayan ilk 10 denklem sırasıyla aşağıdaki gibidir;

Eşitlik 19 (1.67); eşitlik 35 (1.67); eşitlik 36 (1.66); eşitlik 8 (1.63); eşitlik 29 (1.55); eşitlik 25 (1.51); eşitlik 14 (1.51); eşitlik 23 (1.50) ve eşitlik 28 (1.50).

4 Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmanın amacı, mekanize kazı makinalarındaki keskin tahmini tüketimlerinin belirlenmesinde kullanılan Cerchar aşınma indeksi (CAI) ve diğer kayaç özelliklerini kullanarak temel mühendislik parametresi olan UCS'nin pratik ve anlamlı şekilde tahmin edilmesine yönelik eşitlikler ortaya koymaktır. Bilindiği gibi kayaçların UCS değerlerinin tespiti pahalı ve zaman alıcıdır. Numunelerinin hazırlanması ve test edilmesi için gelişmiş ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Buna karşın CAI deney aparatı taşınabilir ve arazi koşullarında rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca belli bir geometrik şekle sahip olmayan çok küçük kayaç parçaları bile test için kullanılabilir. CAI deneyinin bu avantajlarından yola çıkılarak planlanan ve gerçekleştirilen bu deneysel ve istatistiksel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- ✓ Test edilen 35 kayaçın UCS değerleri 6.64-148.36 MPa, CAI değerleri 0.68-2.67 arasında değişmektedir. Kayaçların tamamı CAI sınıflamasına göre orta aşındırıcılık kategorisinin altında, büyük bir bölümü ise düşük aşındırıcılık sınıfında yer almaktadır. ISRM'de tanımlanan UCS sınıflamasına göre ise zayıf ile çok

sağlam kayaç arasında (R2-R5) değişkenlik göstermektedir,

- ✓ Özellikle mikritik yapıya sahip ve yoğunluğu fazla olan kireçtaşlarının oldukça yüksek dayanımlı (R5), çoğunluğu mermerlerden oluşan kayaçların yüksek dayanımlı (R4), tuf ve ignimbiritlerin ise zayıf kaya (R2) kategorisinde olduğu görülmüştür. Test edilen kayaçlarda aşındırıcı minerallerin bulunmadığı düşünüldüğünde, aşınmayı kontrol eden temel parametrelerin yoğunluk ve çimentolanma olduğu çok açıktır,
- ✓ Tablo 3'ten görülebileceği gibi UCS'nin diğer özellikler ile tahmin edildiği korelasyon denklemleri anlamlı ilişkiler ortaya koysa da determinasyon katsayıları çok yüksek değildir (0.532 ile 0.766 arasında değişmektedir). Bahsi geçen bu mühendislik özelliklerinin bir yada iki tanesinin CAI değerleri ile birlikte bağımsız değişken olarak kullanıldığı çoklu regresyon denklemleri incelendiğinde çok daha yüksek determinasyon katsayılarına sahip oldukları görülmüştür. Bu durum çoklu regresyon denklemlerin tahmin güçlerinin tekli korelasyon denklemlere göre daha yüksek olduğunun bir göstergesidir. Pratik olarak tespit edilebilecek bu testlerin verileri kullanılarak UCS'nin güvenilir bir şekilde tahmini mümkün olacaktır,
- ✓ Yapılan regresyon analizlerine göre üç bağımsız değişkenin kullanıldığı modellerin iki bağımsız değişkenin kullanıldığı modellere göre daha yüksek determinasyon katsayılarına sahip olduğu görülmüştür,
- ✓ Kayaçların UCS değerlerinin Cerchar aşınma indeksi değerleri ile tahmini yapılırken mühendislik özelliklerinin yanı sıra gözeneklilik, yoğunluk ve doku gibi parametrelerin modellere dahil edilmesinin çok daha güvenilir ve anlamlı ilişkiler ortaya koyacağı düşünülmektedir,
- ✓ Bu çalışma aşındırıcılık özelliği nispeten zayıf olan, aşındırıcı iri kristalli mineraller içermeyen, ağırlıklı olarak kireçtaşları, mermerler ve tüflerin oluşturduğu çok sayıda kayaç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen modellerin yukarıda belirtilen özelliklere sahip kayaçlar için kullanılması uygun olacaktır. Farklı özelliklere sahip kayaçlarda kullanıldığında özen gösterilmelidir. Bu makale kapsamında değerlendirilen parametrelerin, mühendislik girişimlerinde sıkça rastlanan, aşındırıcı mineral içeriği yüksek farklı kayaçlar kullanılarak çalışılması önerilir.

5 Conclusions

The purpose of this study is to present equations for practical and meaningful estimation of UCS, which is the basic engineering parameter, by using other rock properties and the Cerchar abrasiveness index (CAI) used in determining the estimated consumption of chisels in mechanized excavation machines. As it is known, determination of UCS values of rocks is expensive and time consuming. Advanced equipment is required for sample preparation and testing. On the other hand, CAI test apparatus is portable and can be used easily in field conditions. In addition, even very small pieces of rock that do not have a certain geometric shape can be used for testing. The results obtained in this experimental and statistical study, which was planned and performed based on these advantages of the CAI test, are summarized below:

- ✓ The UCS values of the 35 rocks tested vary between 6.64-148.36 MPa and CAI values between 0.68-2.67. All of the rocks are below the medium abrasive category according to the CAI classification, and most of them are in the low abrasive class. According to the UCS classification defined in ISRM, it varies between weak and very strength rocks (R2-R5),
- ✓ It has been observed that limestones with micritic structure and high density are in very high strength (R5), rocks consisting mostly of marbles are in the high strength (R4), while tuff and ignimbrites are in the category of low strength (R2). Considering the absence of abrasive minerals in the tested rocks, it is very clear that the main parameters controlling abrasion are density and cementing,
- ✓ As can be seen from Table 3, although the correlation equations predicted UCS by other properties reveal significant relationships, the coefficients of determination are not very high (ranging between 0.532 and 0.766). When the examined the multiple regression equations in which one or two of these mentioned engineering properties are used as independent variables with CAI values, it was seen that they have much higher determination coefficients. This situation is an indication that the prediction power of multiple regression equations is higher than the simple regression equations. Reliable estimation of UCS will be possible by using the data of these tests, which can be determined practically,
- ✓ According to the regression analysis, it was observed that models using three independent variables have higher coefficients of determination than models using two independent variables.
- ✓ While estimating UCS values of rocks with Cerchar abrasiveness index values, it is thought that including engineering properties as well as parameters such as porosity, density and texture into models will reveal much more reliable and meaningful relationships.
- ✓ This study was carried out using a large number of rocks, which are relatively poor in abrasive properties, mainly composed of limestones, marbles and tuffs that do not contain abrasive coarse crystalline minerals. It will be appropriate to use the obtained models for rocks with the above mentioned properties. Care should be taken when used in rocks with different properties. It is recommended to study the parameters evaluated within the scope of this article using different rocks with high abrasive mineral content, which are frequently encountered in engineering attempts.

6 Kaynaklar

- [1] Atkinson RH. *Hardness Tests for Rock Characterization*. Editor: Hudson JA. Rock Testing and Site Characterization, Principles, Practice and Projects, 105-117, Atkinson-Noland & Associates, Boulder, CO, USA, Pergamon- Oxford Press, 1993.
- [2] Valantin A. "Test Cerchar pour la mesure de la dureté et de l'abrasivité des roches". in: Annexe de l'exposée présentée aux Journées d'Information <<Techniques de creusement>>, Luxembourg, 1973.
- [3] ASTM D7625-10. "Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR Method". ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [4] Johnson ST, Fowell RJ. "Compressive strength is not enough (Assessing pick wear for drag tool-equipped machines)". In: *Proceedings of the 27th US Symp Rock Mechanics, Tuscaloosa, Alabama, USA, 23-25 June 1986*.
- [5] West G. "A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measures sediments". *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 4, 73-78, 1986.
- [6] Çopur H, Eskikaya Ş. "ELI Eyzek Bölgesi M2 marmının fiziksel ve mekanik özelliklerinin mekanize kazı bakımından incelenmesi". *Türkiye 8. Kömür Kongresi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Zonguldak, Türkiye, 4-8 Mayıs 1992*.
- [7] Al-Ameen SL, Waller MD. "The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar abrasive index". *Engineering Geology*, 36, 293-301, 1994.
- [8] Yaralı O, Avcı F. 2002. "Zonguldak, Türkiye TTK Asma Dilaver kömür çevre kayaçlarının Cerchar aşındırıcılık indeksi özelliklerinin ve mekanik kazılabilirliklerinin irdelenmesi". *Proceedings of the 13th Turkish Coal Congress, Zonguldak, Turkey, 29-31 May 2002*.
- [9] Yaralı O, Akçın NA. "Kayaçların Cerchar sertlik indeksi değerleri ile dayanım özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi". *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005. İzmir, Türkiye, 09-12 Haziran, 2005*.
- [10] Dipova N. "Bir tünel güzergâhındaki zayıf kireçtaşlarının aşınma ve dayanım özellikleri arasındaki ilişkilerin araştırılması". *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 36(1), 23-34, 2012.
- [11] Yaralı O. "Kayaçların mekanik özelliklerinin Cerchar aşınma indeksine olan etkilerinin araştırılması". *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi* 6(1), 218-229, 2016.
- [12] ISRM. "Rock Characterization, Testing and Monitoring-Commission on Standardization Laboratory and Field Results. Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks". Pergamon, Oxford, Part 4, 102-103, 1981.
- [13] Alber M, Yaralı O, Dahl F, Bruland A, Käsling H, Michalakopoulos TN, Cardu M, Hagan P, Aydın H, Özarslan A. "ISRM Suggested method for determining the abrasivity of rock by the Cerchar abrasivity test". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 261-266, 2014.
- [14] Smith RL, Sandly GE. "An accurate method of determining the hardness of metals, with particular reference to those of a high degree of hardness". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 102(1), 623-641, 1922.
- [15] Rabia H, Brook N. "The shore hardness of rock". *International Journal of Rock Mechanics Mining Science Geomechanical Abstract*, 16(6), 335-336, 1979.
- [16] Altındag R, Guney A. "ISRM Suggested Method for determining Shore Hardness value for rock". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 43(1), 19-22, 2006.
- [17] Whittaker BN, Singh RN, Sun G. *Rock Fracture Mechanics - Principles, Design and Applications*. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 1992.
- [18] Chong KP, Kuruppu MD. "New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials". *International Journal of Fracture*, 26, 59-62, 1984.
- [19] Chong KP, Kuruppu MD, Kuszmaul JS. "Fracture toughness determination of layered materials". *Engineering Fracture Mechanics*, 28(1), 43-54, 1987.