



Başyukarı Delme Makinelerinin Performans Tahminine Yönelik Konik ve Buton Uçlarla Yapılan Uç Batırma Deney Verileri Arasındaki İlişkiler

Relationships between Indentation Test Data of Conical and Button Indenters Toward Predicting Performance of Raise Boring Machines

AYDIN SHATERPOUR-MAMAGHANI ^{1*}, HANİFİ ÇOPUR ¹, CEMAL BALCI ¹, DENİZ TUMAÇ ¹, TAYFUN ERDOĞAN ², ENGİN DOĞAN ³, AYHAN KOÇBAY ⁴

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Sargın İnşaat ve Makine Sanayi Ticaret A.Ş., Ankara, Türkiye

³ Yüksek Maden Mühendisi, İstanbul, Türkiye

⁴ Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

Geliş (received): 27 Kasım (November) 2025 Kabul (accepted): 3 Şubat (February) 2026

ÖZ

Uç batırma deneyi, Başyukarı Delme Makineleri (BDM) ve Tünel Açma Makineleri (TBM) gibi mekanize kazı sistemlerinin performanslarını tahmin etmek için kullanılabilen bir yöntemdir. Standart bir yöntem olmamakla birlikte, başlangıçta keskin ve deliciler üzerine etkiyen normal kuvvetin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş, zamanla kazı performansı değerlendirmelerinde sıkça başvurulan bir araç hâline gelmiştir. Deneylerde genellikle konik uçlar kullanılmaktadır. Ancak BDM'lerinde kullanılan buton keskinlikte, daha düz yüzeyli ve prizmatik tungsten karbür buton uçlar tercih edilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bazı performans tahmin modelleri, gerçek boyutlu buton uçlarla yapılan deney sonuçlarına dayanmaktadır. Konik ve buton uçlarla elde edilen deneysel veriler arasında istatistiksel ilişkiler kurulabilirse, konik uçlar da BDM performans tahminlerinde kullanılabilir. Bu çalışmada, Türkiye'de başyukarı delme yöntemiyle açılmış kuyulardan alınan beş farklı kayaç örneği üzerinde, konik ve buton uçlarla uç batırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her iki uç tipine ait kuvvet-penetrasyon eğrilerinden ortalama eğim, tepe eğimi, ortalama kuvvet eğimi ve uç batırma iş indeksleri elde edilmiş ve aralarındaki ilişkiler araştırılmıştır. Her iki uç tipi ile elde edilen indeksler arasında güçlü korelasyonlar saptanmıştır. Ayrıca, konik uç verileriyle kayaçların fiziksel-mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler de incelenmiş ve bazı anlamlı ilişkiler olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Başyukarı delme makinesi, Buton uç, Konik uç, Performans tahmini, Uç batırma deneyi

ABSTRACT

The indentation test offers a method for evaluating the performance of mechanized excavation systems such as Raise Boring Machines (RBMs) and Tunnel Boring Machines (TBMs). Although not standardized and originally developed for determining the normal forces acting on cutters and drill bits, the method has become

an essential tool for evaluating excavation performance. Conical indenters are typically used in the tests. However, real-size button inserts made of prismatic tungsten carbide with flatter surfaces are often preferred on RBM cutting tools. Some of the widely used performance prediction models currently rely on the results from indentation tests conducted with button inserts. Establishing a statistical correlation between the results of tests using conical and button indenters would allow also the conical indenters to be used in RBM performance estimations. In the present study, indentation tests are performed on five different rock samples collected from the shafts excavated by the RBMs in Türkiye. Both conical and button indenters are employed in the tests. The average slope, peak slope, average force slope and indentation work indices are derived from the force-penetration curves and their relationships are analyzed. Strong relationships are observed between the indexes obtained from both types of the indenters. Furthermore, the relationships between the conical indenter test results and the physical and mechanical properties of the rocks are also analyzed, and some notable relationships are observed.

Keywords: Raise boring machine, Button indenter, Conical indenter, Performance prediction, Indentation test

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1830607>

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: mamaghani@itu.edu.tr

GİRİŞ

Yeraltı yapılarının kazısı, madencilik ve inşaat sektörlerindeki en karmaşık ve zorlu mühendislik uygulamalarıdır. Mekanize kazı yöntemleri, geleneksel yöntemin bir alternatif olarak yeraltı kazılarında giderek daha fazla tercih edilmektedir. Başyukarı Delme Makineleri (BDM), özellikle iki yeraltı açıklığı arasında dairesel dikey veya eğimli bir kuyu açılması gereken durumlarda, klasik delme ve patlatma yöntemine göre sundukları avantajlar nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Farklı çap ve eğimlerde kazı yeteneği, uygun zemin koşullarında daha güvenli ve hızlı kazı imkânı, daha düşük toplam maliyet gibi avantajlar, bu yöntemin tercih edilme nedenleri arasındadır. BDM teknolojisinin yüksek ilk yatırım maliyetleri ve çok sert ve aşındırıcı kayalarda verimsizlik gibi bazı sınırlamaları da bulunmaktadır (Bilgin vd., 2014).

Literatürde BDM'ler ile kuyu açma konusunda birçok vaka çalışması bulunmasına rağmen, performans tahmin modelleri üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Shaterpour-Mamaghani ve Çopur (2021)'de özetlendiği gibi, literatürde bulunan BDM performans tahmin modellerinin çoğu tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı (Brezilya) çekme dayanımı, Schmidt çekici sertliği ve kaya kalite değeri

(RQD) gibi kayaçların malzeme ve kütsel özellikleri ile keski sayısı ve kazı çapı gibi makine parametrelerine dayanan görgül (ampirik) modellerdir. BDM performans tahmini konusundaki çalışmaların ortak sonucu, ilerleme hızının daha hassas tahmin edilebilmesi için özellikle kaya deneylerine yönelik, örneğin uç batırma deneyi, ek araştırmalara ihtiyaç duyulduğudur (Bilgin, 1989; Dollinger vd., 1998).

Uç batırma deneyi, BDM, Tünel Açma Makineleri (TBM) ve delicilerin kazı hızlarını öngörmeye kullanılan laboratuvar yöntemlerinden biridir. Başlangıçta kazı makinelerinde kullanılan buton ve disk keskilere etkiyen normal kuvvetin tahmin edilmesine yönelik olarak geliştirilmiştir. Henüz standartlaştırılmamış olan bu deneyde temel yaklaşım, gerçek bir keski üzerinde etkili olacak kuvvetleri, uç batırma deneyinden elde edilen kuvvet-penetrasyon verilerinin eğriye uyarlanması yoluyla tahmin etmektir. Bu yöntem ilk olarak metaller üzerinde mikro ölçekte uygulanmıştır. Daha sonra seramikler, kayaçlar gibi diğer malzemelerde makro ölçekte dönüştürülerek uygulanmıştır.

Literatür incelemeleri, uç batırma deneyinin analizinde kullanılan ucun şekli ve boyutunun

yanı sıra, uç ile malzeme arasındaki sürtünme katsayısının da belirleyici iki önemli faktör olduğunu göstermektedir. Lindqvist (1984) uç batırmada kaya davranışının üç parametreden etkilendiğini ifade etmiştir. Bunlar; kaya özellikleri (malzeme sınıfı, mekanik özellikler, gözeneklilik), çevresel faktörler (yanal basınç, sıcaklık) ve yükleme türüdür (uç şekli, yükleme yönü, yükleme seviyesi, yükleme hızı).

Çopur (1999) ve Çopur vd. (2003 a,b) konik bir uç ile yapılan uç batırma deneylerine dayalı bazı indeksler önermişlerdir. Bu indeksler kullanılarak konik keskinlerin performanslarının tahminine yönelik çeşitli modeller geliştirmişlerdir. Shaterpour-Mamaghani vd. (2023) gerçek boyutlu bir buton uç ile yaptıkları uç batırma deneylerine dayalı olarak çeşitli indeksler önermişler ve BDM'lerin performanslarının tahmininde bu indekslerin kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Uç batırma deneylerinde genellikle konik uçlar tercih edilmektedir (Tablo 1). Ancak, BDM'lerin genişletme kafasındaki buton keskinlerde genellikle prizmatik şekilde olan buton uçlar kullanılmaktadır. Son zamanlarda geliştirilen ve yaygın olarak kullanılmaya başlanan BDM performans tahmin modellerinde de gerçek boyutlu buton uçlarla yapılan deneyler kullanılmaktadır (Shaterpour-Mamaghani vd., 2023). Bu nedenle, konik ve buton uçlarla yapılan uç batırma deney sonuçlarının ilişkilendirilmesi, BDM performans tahminlerinde konik uçlarla elde edilen uç batırma deney verilerinin değerlendirilmesini de sağlayacaktır.

Bu çalışmanın temel amacı, konik ve buton uçlar ile yapılan uç batırma deneylerinden elde edilen farklı indeksler arasındaki ilişkileri incelemektir. Bu kapsamda, Türkiye'de BDM'ler ile kuyu kazısı yapılmış olan Balya Kurşun-Çinko Madeni ve Yusufeli Barajı HES kuyu projelerinden alınan beş farklı kayaç örneği üzerinde hem konik hem de buton uçlar

kullanılarak uç batırma deneyleri yapılmıştır. Deneylerden her iki uç tipi için elde edilen ortalama eğim, tepe eğimi, ortalama kuvvet eğimi ve uç batırma iş indeksleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Ayrıca, konik uç ile yapılan deneylerden elde edilen veriler ile kayaç örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler de araştırılmıştır.

Literatürde, konik ve buton uçlar kullanılarak gerçekleştirilen uç batırma deneylerine ilişkin çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, bu iki farklı uç tipinden elde edilen indeksler arasındaki doğrudan ilişkilerin sistematik ve karşılaştırmalı olarak incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yönüyle çalışma, konik ve buton uçlara ait uç batırma indeksleri arasındaki ilişkileri ortaya koyarak mevcut literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Fiziksel-mekanik özellik deneyleri

Balya Kuşun-Çinko Madeni projesinden elde edilen kireçtaşı-1, kireçtaşı-2 ve skarn örnekleri ile Yusufeli Barajı ve HES projesine ait diyabaz ve granodiyorit örnekleri üzerinde tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı (Brezilya) çekme dayanımı, akustik dalga hızları (P ve S dalgaları), Shore scleroscope sertlik ve Schmidt çekici sertlik deneyleri yapılmıştır. Schmidt Çekici deneyleri L-9 tipi çekiç kullanılarak, Shore scleroscope deneyleri ise C-2 tip deney aleti kullanılarak Fowell ve McFeat-Smith (1976) ve McFeat-Smith (1977) önerdiği yöntemlerle yapılmıştır. Akustik hız deneyleri, ASTM (2008) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Diğer deneyler ISRM (2007)'ye göre yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Uç batırma deneyleri

Uç batırma deneyinde, standart bir prosedür bulunmadığından, literatürde farklı numune boyutları, çeşitli uç şekilleri ve değişik boyutlarda çelik halka (tüp) kalıplar

Tablo 1. Literatürde uç batırma deneylerinde kullanılan çelik boru, kayaç numunesi ve uçların özelliklerine ilişkin bazı veriler (Shaterpour-Mamaghani vd., 2023'den geliştirilerek).

Table 1. Some data in the literature regarding the properties of the steel tubes, rock specimens, and indenters used in indentation tests (adapted and expanded from Shaterpour-Mamaghani et al., 2023).

Çelik boru (tüp)			Kayaç örneği			Uç özellikleri			Kaynak
D _{in} (mm)	D _{ou} _t (m m)	T _w (mm)	L _s (mm)	D (mm)	L/D (-)	Şekil	Uç açısı (°)	Uç körlenme yarıçapı (mm)	
-	10 2	-	101,6	-	-	-	-	-	Handewith (1970)
114,3 ^a	-	-	-	57,1	-	Konik	-	-	Dollinger (1978)
114,3 ^a	-	-	-	53,3	1,0-1,5	Konik	120	3,175	Çopur (1999)
54	-	-	-	54,0	1,4	Yarım küre	-	9,500	Gertsch (2000)
110	11 8	4	100	53,0	1,5	Konik	75	3,000	Çopur vd. (2003b)
-	11 5	-	-	54,0	1,0	Konik	120	3,175	Yağız (2009)
-	60	-	-	44,7	0,7	Konik	144, 5	2,500	Abu Bakar (2012)
82	10 2	10	-	54,0	1,3	Konik	120	3,175	Erben (2013)
138	15 8	10	81	54,0 ^a	0,5-1,25	Konik	120	3,175	Jeong vd. (2016)
220	24 0	10	120	110,0 ^b	-	Konik	120	3,175	Anemangely vd. (2018)
110	12 6	8	100	47,0- 63,0	~1,5	Buton	-	-	Shaterpour-Mamaghani vd. (2023)

D_{in}: boru iç çapı, D_{ou}_t: boru dış çapı, T_w: boru et kalınlığı, L_s: boru uzunluğu, D: karot çapı, L: karot uzunluğu. ^a Ayrıca, çapları 54 ile 125 mm arasında değişen farklı karot numunelerini de test etmişlerdir. ^b Numuneler, çapları boyunca kesilerek iki ya da dört daha küçük numuneye ayrılmıştır.

Tablo 2. Çalışma kapsamında kullanılan kayaç örneklerinin fiziksel-mekanik özellikleri (Shaterpour-Mamaghani vd., 2022, 2023).

Table 2. Physical and mechanical properties of the rock samples used in this study (Shaterpour-Mamaghani et al., 2022, 2023).

	Granodi yorit	Diyabaz	Skarn	Kireçtaşı-1	Kireçtaşı-2
ρ (g/cm ³)	2,68	2,85	3,14	2,71	2,73
UCS (MPa)	104,49	130,67	88,40	81,78	77,90
BTS (MPa)	11,09	7,81	5,94	5,17	4,90
V _P (m/s)	4.225	4.700	3.005	2.904	2.782
V _S (m/s)	2.523	2.964	1.784	1.773	1.733
SHH (-)	53,4	58,6	52,7	49,8	41,2
SSH (-)	69,1	79,4	64,8	62,3	56,7

ρ : yoğunluk, UCS: tek eksenli basınç dayanımı, BTS: dolaylı (Brezilya) çekme dayanımı, V_P: akustik P dalga hızı, V_S: akustik dalga hızı, SHH: Schmidt çekici sertliği, SSH: Shore scleroscope sertliği.

kullanılmaktadır. Ancak, Colorado School of Mines Excavation Engineering and Earth Mechanics Institute'de uygulanan prosedür dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu deneyde içi boş silindirik bir çelik tüp (halka, boru) içine ortalı yerleştirilen karot kaya örneği üzerine metal bir uç (indenter) belirli bir hızda istenen batma derinliğine (penetrasyon) gelinceye kadar bir presle bastırılır ve bu esnada uca etkiyen kuvvet ve ucun batma derinliği eş zamanlı bir şekilde elektronik olarak kaydedilir.

Bu çalışmada uç batırma deneyleri 3.100 kN kapasiteli bir katı (stiff) pres kullanılarak 0,0254 mm/s (0,001 inç/s) sabit yükleme hızında yapılmıştır. Deneyler, 5~6 mm batma derinliğinde sonlandırılmıştır (deney stroğu, maksimum penetrasyon). Batma derinliği (penetrasyon) ölçümleri çelik tüpün sağında ve solunda bulunan iki adet ve presin alt silindirin üzerinde bulunan bir adet (toplamda üç adet) Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör (LVDT) ölçümlerinin ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Bu çalışmada kullanılan deney sistemi ve aparatlar Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Uç batırma deneylerinde kullanılan katı pres ve deney aparatları.

Figure 1. Stiff press and experimental apparatus used in the indentation tests.

Bu çalışmada yaklaşık boyutu 5×5×5 cm³ olan (her bir boyut 45 ile 60 mm arasında) prizmatik kayaç örnekleri kullanılmıştır. Sadece skarn için 63 mm çapında ve boy/çap oranı 1,3~1,5 arasında olan karot numuneler kullanılmıştır. Numunelerin üst ve alt yüzeyleri karot testeresi ile mümkün olduğunca düz olarak kesilmiştir. Her bir kayaç türü için 2şer adet örnek hazırlanmıştır; birinde konik uç diğerinde buton uç kullanılmıştır.

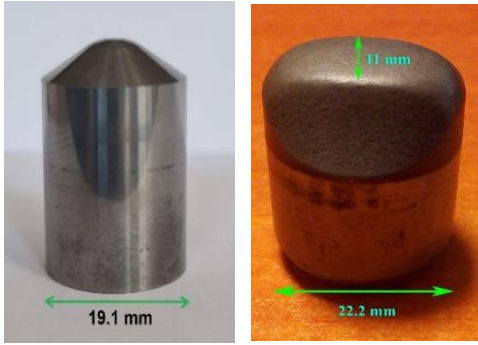
Deneylerde kullanılan çelik tüpün iç çapı 110 mm, dış çapı 126 mm (et kalınlığı 8 mm) ve uzunluğu ~100 mm'dir. Çelik tüp, düzgün bir zemine yerleştirilen bir naylon parçası üzerine koyulduktan sonra, kayaç örneğinin uç batırılacak yüzeyi tabana gelecek şekilde ortalananak çelik tüp içine yerleştirilir. Çelik tüp ile kayaç örneği arasında kalan boşluk, alçı dökülerek doldurulur.

Alçı kürlendikten (istenen dayanımı aldıktan) sonra, düzgün bir yükleme sağlamak için çelik tüplerin üst yüzeylerindeki taşan kurumuş alçı törpü ve zımpara ile düzleştirilmiştir (tercihen torna makinesinde düzleştirilmelidir).

Kullanılan alçı Türkiye'de "alfa alçı" olarak tanınır. Hızlı kür alabilen (birkaç saat) ve genellikle heykel yapımında kullanılan bir malzemedir. Bu çalışmada uç batırma deneyleri 28 gün kür süresinden sonra yapılmıştır. Alfa alçının 28 gün kür aldıktan sonraki yoğunluğu 1,70 g/cm³, tek eksenli basınç dayanımı 18 MPa, statik elastisite modülü 5,4 GPa ve statik Poisson oranı 0,16'dır (Çopur vd., 2022).

Deneyler tüm kayaç numunelerinde hem konik ve hem de buton uçlar kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2). BDM'lerde kullanılan gerçek bir buton keskinden alınan tungsten karbür buton uç 22,2 mm çapında ve 11 mm genişliğinde prizmatik olup kenarları ovaldir. Tungsten karbürden yapılmış konik uç ise 120° koniklik açısına, 3,125 mm körlenme yarıçapına ve 19,1 mm çapa sahiptir.

Deneylerde öncelikle veri toplama sistemi devreye alınmıştır (veri örnekleme hızı 20 Hz). Numuneler, katı pres makinesinin oynar başlıklı yükleme plakasına sabitlenen ucun altına ortalanarak uç numuneye çok az (hafifçe) dokunacak şekilde numune yüksekliği ayarlanıp deneye hazır hale getirilmiştir. Daha sonra uç, numunenin ortasına 0,0254 mm/saniye (0,001 inç/saniye) hızda batırılmıştır ve 6 mm batma derinliğine ulaşıncaya kadar deneye devam edilerek elektronik kayıt alınmıştır. Veri toplama sistemi aracılığıyla zaman, penetrasyon (üç LVDT okumasının ortalaması) ve uygulanan kuvvet parametreleri eşzamanlı olarak bir bilgisayara ASCII formatında kaydedilmiştir. Deney öncesi ve sonrasında numune yüzeylerinin fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Uç batırma deneylerinde kullanılan konik (soldaki) ve buton (sağdaki) uçlar.

Figure 2. Conical (left) and button (right) indenters used in the indentation tests.

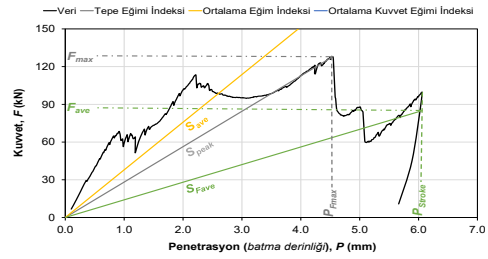


Şekil 3. Deney öncesi (solda) ve sonrası (sağda) numune yüzeyi fotoğraf örnekleri.

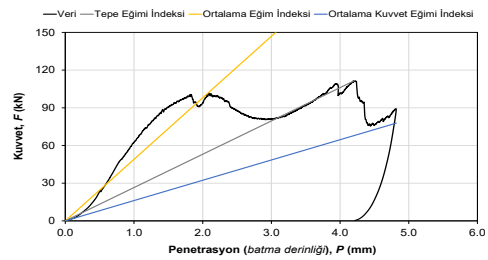
Figure 3. Example photographs of the specimen surface before (left) and after (right) the test.

Elde edilen ASCII formatındaki ham veriler Excel formatına dönüştürülerek, amaca göre değerlendirilmiştir / işlenmiştir / hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 4'te, konik ve buton uçlar kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen kuvvet - penetrasyon grafiği örnekleri görülmektedir.

Deneye ilk başlarken uç ile kayacın birbirine hafifçe dokunuyor olması gerekirken, bazen hiç temas olmamakta (sıfır, boşluklu), bazen de çok az (milimetrenin fraksiyonları düzeyinde) batma olabilmektedir. Bu düzensiz veya stabil olmayan veri durumu, sonuçları az da olsa etkilediğinden, batma derinliği genellikle 0,05 - 0,1 mm'ye kadar olan veriler kesilerek değerlendirmelerde dikkate alınmamıştır, stabil veri dikkate alınmıştır. Veriler kullanılarak hesaplanan indeksler aşağıda anlatılmaktadır; hesaplarda kullanılan parametreler Şekil 4'de konik uç için gösterilmiştir.



(Konik uç)



(Buton uç)

Şekil 4. Uç batırma deneylerinden elde edilen örnek kuvvet - penetrasyon değişimi grafikleri.

Figure 4. Examples of force - penetration variation graphs obtained from the indentation tests.

Her bir i 'inci ölçüm noktasındaki "Eğim" (Slope) değeri (S_i), o noktada ölçülen kN biriminde normal kuvvetin (F_i) yine o noktada ölçülen mm biriminde penetrasyona (P_i) oranı olarak Denklem (1)'deki gibi (kN/mm biriminde) hesaplanmıştır. Burada, indis " i " ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) ölçüm alınan noktanın numarasını ve " n " toplam ölçüm noktası sayısını göstermektedir. F_i kuvveti, kayaç örneği yüzeyine dik olarak etkiyen normal kuvvettir.

$$S_i = \frac{F_i}{P_i} \quad (1)$$

Deney süresince ölçüm noktalarında elde edilen tüm eğim değerlerinin aritmetik ortalaması "Ortalama Eğim İndeksi" (S_{ave}) olarak Denklem (2)'deki gibi (kN/mm biriminde) hesaplanmıştır.

$$S_{ave} = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum_i^n (S_i) \quad (2)$$

Deney süresince herhangi bir i ölçüm noktasında ölçülen maksimum normal kuvvetin (F_{max}), buna karşılık gelen aynı noktadaki penetrasyon değerine (P_{Fmax}) oranı "Tepe Eğimi İndeksi" (S_{peak}) olarak Denklem (3)'deki gibi (kN/mm biriminde) hesaplanmıştır. Bu indeks, grafiğin orijini ile F_{max} noktası arasından geçen doğrunun eğimidir.

$$S_{peak} = \frac{F_{max}}{P_{Fmax}} \quad (3)$$

Ortalama eğim ve tepe eğimi indeksleri Colorado School of Mines Earth Mechanics Institute'de geliştirilmiş ve halen kullanılmaktadır. Tepe eğimi indeksi, Yağız (2009) tarafından kırılma indeksi olarak adlandırılarak sabit kesitli tekli disk keski kullanılan sert kaya TBM'lerinin ve Shaterpour-Mamaghani vd. (2023) tarafından buton keski kullanılan BDM'lerin kazı performanslarının tahmininde kullanılmıştır.

Bu çalışmada hesaplanan "Ortalama Kuvvet Eğimi İndeksi" ile "Uç Batırma İş İndeksi" olarak adlandırılan ve aşağıda anlatılan indeksler Jeong vd. (2016)'da tanımlanmıştır; Colorado

School of Mines Earth Mechanics Institute'de geliştirilen "Enerji Eğimi İndeksi"nin bir benzeridir.

"Ortalama Kuvvet Eğimi İndeksi" (S_{Fave}) deney süresince her bir i ölçüm anında ölçülen normal kuvvet değerlerinin (F_i) Denklem (4)'deki gibi (kN biriminde) hesaplanan ortalamasının (F_{ave}), deney süresince ulaşılan maksimum batma derinliğine (maksimum penetrasyona veya maksimum uç batma stroğuna) (P_{stroke}) oranı olarak Denklem (5)'deki gibi (kN/mm biriminde) hesaplanmıştır.

$$F_{ave} = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum_i^n (F_i) \quad (4)$$

$$S_{Fave} = \frac{F_{ave}}{P_{stroke}} \quad (5)$$

Söz konusu ortalama normal kuvvet (F_{ave}) ile yapılan iş ise bu çalışmada "Uç Batırma İş İndeksi" (W_{Fave}) olarak tanımlanmıştır ve Denklem (6)'daki gibi (kN.mm (= Joule) biriminde) hesaplanmıştır.

$$W_{Fave} = \int_0^{P_{stroke}} F_i dP = F_{ave} \cdot P_{stroke} \quad (6)$$

W_{Fave} kuvvet-penetrasyon eğrisinin altında kalan alandır; ucun ilgili kayada deney boyunca yaptığı toplam işi, diğer bir deyişle deformasyon (batma) süresince harcanan toplam enerjii temsil eder. Her bir birim penetrasyon artışında normal kuvvet artışına da karşılık gelir.

Kullanılan her iki tip uçta elde edilen sonuçlar, her bir kayaç örneği için Tablo 3'te özetlenmiştir.

İSTATİSTİKSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın temel amacı, konik ve buton uçlar ile yapılan uç batırma deneylerinden elde edilen farklı indeksler arasındaki ilişkileri incelemektir. Bunun için Tablo 3'teki veriler kullanılarak, iki tip ucun deney verileri arasındaki ilişkiler MS Excel'de basit regresyon yöntemi (tek değişkenli: bir bağımlı ve bir bağımsız değişken) kullanılarak incelenmiştir. Değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek için

farklı fonksiyonlar (doğrusal, eksponansiyel, logaritmik ve üstel) denenmiştir. Modellerin doğruluk (güvenirlilik) düzeyi, determinasyon katsayısı (R^2), regresyon eşitliğinin önem değeri (p , significance value), varyasyon şişme faktörü (VIF, variation inflation factor), t ve F istatistik değerleri ile değerlendirilmiştir. Her iki uçtan elde edilen indekslerin ilişkileri Şekil 5 ve Denklem (7-10)'da özetlenmiştir. Bu denklemlerde "K" indisi konik uç ve "B" indisi buton uç anlamına gelmektedir.

$$S_{ave-B} = 4,75 \times S_{ave-K}^{0,59} \quad (7)$$

$$S_{peak-B} = 2,68 \times S_{peak-K}^{0,67} \quad (8)$$

$$S_{Fave-B} = 1,74 \times S_{Fave-K}^{0,83} \quad (9)$$

$$W_{Fave-B} = 2,51 \times W_{Fave-K}^{0,79} \quad (10)$$

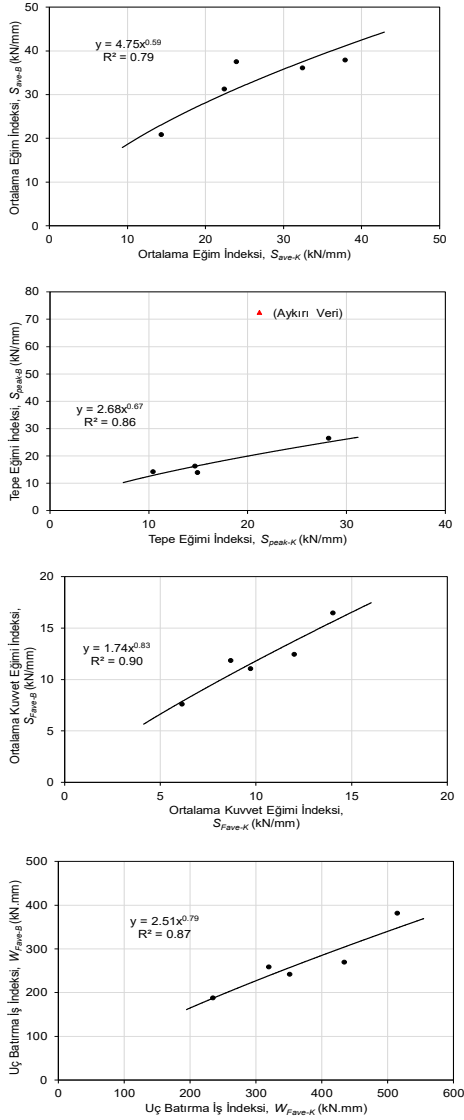
Regresyon modelleri incelendiğinde, tüm ilişkilerde üstel (kuvvet) fonksiyon uygulanması durumunda, bazı R^2 değerlerinde çok düşük değişim (%1-5) olduğu görülmüştür. Ayrıca, üstel (kuvvet) fonksiyonun önemli bir avantajı ilişki eğrisi (0,0) noktasından geçmektedir; bu da fiziksel olarak beklenen ve daha uygun bir durumdur. Bu nedenle Şekil 5'de görülen tüm ilişkiler üstel fonksiyonla belirlenmiştir.

Tablo 3. Uç batırma deney sonuçlarının özeti.

Table 3. Summary of the indentation test results.

Konik Uç				
Örnek	S_{ave-K} (kN/mm)	S_{peak-K} (kN/mm)	S_{Fave-K} (kN/mm)	W_{Fave-K} (kN.mm)
Granodiyorit	32,43	14,66	12,00	433,97
Diyabaz	37,90	28,17	14,02	514,78
Skarn	23,94	21,20	8,67	319,40
Kireçtaşı-1	14,33	10,42	6,13	234,50
Kireçtaşı-2	22,40	14,92	9,71	351,22
Buton Uç				
Örnek	S_{ave-B} (kN/mm)	S_{peak-B} (kN/mm)	S_{Fave-B} (kN/mm)	W_{Fave-B} (kN.mm)
Granodiyorit	36,15	16,26	12,45	269,89
Diyabaz	37,89	26,52	16,47	381,81
Skarn	37,55	72,52	11,85	259,17
Kireçtaşı-1	20,87	14,22	7,60	188,08
Kireçtaşı-2	31,32	13,96	11,06	242,12

S_{ave} : ortalama eğim indeksi, S_{peak} : tepe eğimi indeksi, S_{Fave} : ortalama kuvvet eğimi indeksi, W_{Fave} : uç batırma iş indeksi.



Şekil 5. Konik ve buton uçların ortalama eğim, tepe eğimi, ortalama kuvvet eğimi ve uç batırma iş indeksleri arasındaki ilişkiler.

Figure 5. Relationships between the average slope, peak slope, average force slope, and indentation work indices of the conical and button indenters.

İki tip uçtan elde edilen indeksler arasında güçlü ilişkiler elde edilmiştir. Denklem (8)'in önem değeri (p) %5'den büyük (~%7) çıkmıştır. Diğer bir deyişle güven aralığı (confidence

interval) %93 civarındadır. Yerbilimlerinde bu güven aralığı kabul edilebilir nitelikte olmasına rağmen, bu denklem dikkatli kullanılmalıdır. VIF değerleri 1,0 olarak belirlenmiştir ve bu değer 10'un altında olması istenir. En küçük t istatistik değeri 3,4 ve F değeri 6,5 olarak istatistik testleri de geçmiştir.

Tepe eğimi indeksinde skarn numunesine ait veri ayırık olarak değerlendirilmiştir. Skarn numunesi için hesaplanan diğer bazı indekslerin de ayırık davrandığı yazarların önceki bir yayınında belirtilmiştir (Shaterpour-Mamaghani vd., 2023).

İki uç ile elde edilen indekslerin güçlü ilişkiler göstermesi, konik uçla yapılan deney sonuçlarının buton uçla yapılan deney sonuçlarına rahatlıkla dönüştürülüp, literatürde bulunan buton uç batırma deneyi ile BDM performansı tahmin modellerinde kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Buton uç için S_{ave-B} , S_{peak-B} , S_{Fave-B} ve W_{Fave-B} değerlerinin kendi içindeki istatistiksel ilişkiler incelendiğinde, S_{Fave-B} ile W_{Fave-B} değerleri arasında çok yüksek bir ilişki olduğu görülmüştür ($R^2=0,90$), bu indekslerin hesabında aynı parametreler kullanıldığı için, çok yüksek ilişki çıkması beklenen durumdur. Bu nedenle S_{Fave-B} ile W_{Fave-B} indekslerinden sadece birini kullanmak (tercihen S_{Fave-B}) yeterli olacaktır. S_{ave-B} ile S_{peak-B} arasında zayıf bir ilişki görülmüştür ($R^2 = 0,38$), diğer tüm ilişkiler ise orta güçlü seviyededir ($R^2 = 0,66\sim 0,82$).

Konik uç için S_{ave-K} , S_{peak-K} , S_{Fave-K} ve W_{Fave-K} değerlerinin kendi içindeki istatistiksel ilişkiler incelendiğinde, S_{ave-K} , S_{Fave-K} ve W_{Fave-K} değerleri arasında çok güçlü ilişkiler olduğu ($R^2 = 0,97\sim 0,99$ arasında) görülmüştür. S_{peak-K} diğer indekslerle orta güçlü ilişkiler göstermiştir ($R^2 = 0,73\sim 0,78$).

Buton uç batırma deneylerinden elde edilen tepe eğimi indeksi ve değişik bazı indeksler ile kayaçların fiziksel-mekanik özellikleri

arasındaki ilişkiler, yazarların daha önceki bir yayınında (Shaterpour-Mamaghani vd., 2023) detaylı olarak incelendiğinden, bu çalışmada yer verilmeyecektir. Ancak, bu çalışmada konik uç batırma deney sonuçları ile kayaçların fiziksel-mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Tablo 2 ve 3'te görülen veriler kullanılarak basit regresyon analizi yapılmıştır. Analizlerde farklı eğri fonksiyonları denenmiştir. En yüksek R^2 değeri veren denklemler (hepsi de doğrusal fonksiyon çıkmıştır) Şekil 6 ve Denklem (11-14)'de verilmiştir.

$$S_{ave-K} = 0,0096 V_P - 7,53 \quad (R^2=0,84, p=0,03) \quad (11)$$

$$S_{peak-K} = 0,25 UCS - 6,23 \quad (R^2=0,60, p=0,12) \quad (12)$$

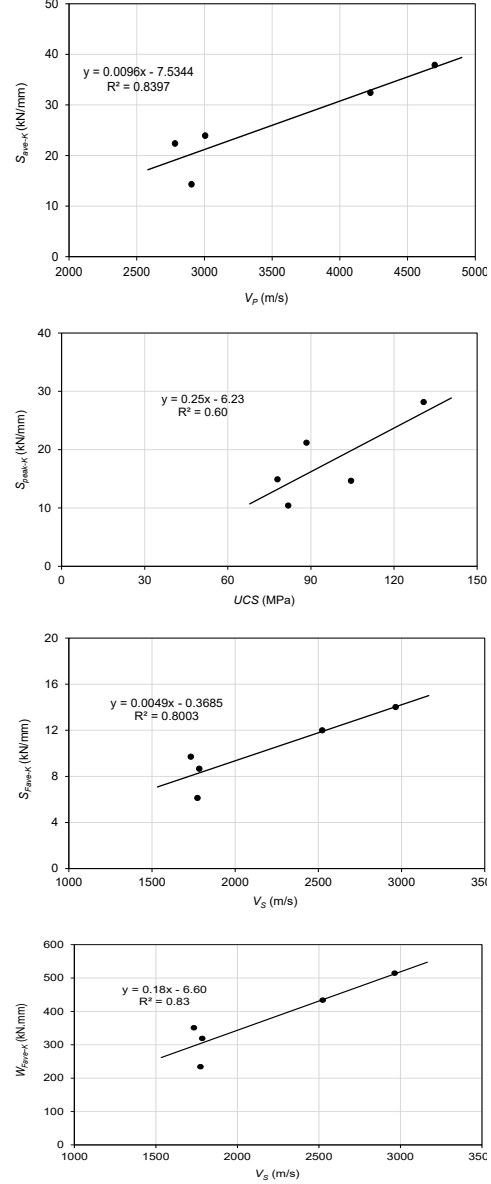
$$S_{Fave-K} = 0,0049 V_S - 0,37 \quad (R^2=0,80, p=0,04) \quad (13)$$

$$W_{Fave-K} = 0,18 V_S - 6,60 \quad (R^2=0,83, p=0,03) \quad (14)$$

Bu denklemlerde UCS tek eksenli basınç dayanımı (MPa), V_P akustik P dalga hızı (m/s) ve V_S akustik S dalga hızıdır (m/s). Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, girdi ve çıktı parametreleri arasında orta ile yüksek düzeyde ilişkiler görülmüştür. Dolaylı çekme (Brezilya) dayanımı, konik uç batırma deneylerinden elde edilen indekslerle zayıf bir ilişki göstermiştir. Bunun muhtemel nedeninin, uç batırma deneyinde temel olarak basınç oluşturan kuvvetlerin etkin olmasıdır diye düşünülmektedir.

Denklem (12)'nin önem değeri (p) %12 çıkmıştır. Diğer bir deyişle güven aralığı (confidence interval) %88 civarındadır. Yerbilimlerinde bu güven aralığı kabul edilebilir nitelikte olmasına rağmen, bu denklem dikkatli kullanılmalıdır. VIF değerleri 1,0 olarak belirlenmiştir. En küçük t istatistik değeri 2,1 ve

F değeri 4,6 olarak istatistik testleri de geçmiştir.



Şekil 6. Konik uçtan elde edilen indeks değerler ile kayaçların fiziksel-mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler.

Figure 6. Relationships between the index values obtained from the conical indenter and the physical-mechanical properties of the rocks.

TARTIŞMA

Uç batırma deneylerinden elde edilen indeksler, son yıllarda kazı makinelerinin performans tahmininde kullanılmaktadır. Bu deneylerde farklı uç tipleri (konik, buton, yarı-küresel, vb.) kullanılarak, kaya-uç etkileşiminden elde edilen kuvvet-penetrasyon verileri çeşitli indekslere dönüştürülmekte ve bu indeksler üzerinden kazı performansı tahmin modelleri geliştirilmektedir.

Jeong vd. (2016) konik uç ile gerçekleştirdikleri sistematik uç batırma deneylerinden türettikleri iki indeks aracılığıyla, tepe eğimi indeksi (peak slope index, *PLI*) ve ortalama eğim indeksi (mean slope index, *MLI*), TBM'lerde kullanılan disk keskilere etkiyen normal kuvveti (*FN*) ve yuvarlanma kuvvetini (*FR*) tahmin etmeye yönelik modeller geliştirmiştir. Bu çalışmada, deneysel verilerden türetilen eğim temelli indekslerin, gerçek kazı koşullarındaki disk keski yükleri ile güçlü korelasyonlar gösterdiği belirtilmiştir.

Shaterpour-Mamaghani vd. (2023), buton uç kullanarak yaptıkları uç batırma deneylerinden elde ettikleri sonuçları BDM'lerine uyarlamış ve özellikle genişletme kafasının çekme kuvveti (F_{Pull}) ile anlık kazı hızının (instantaneous penetration rate, *IPR*) tahmini için yeni modeller geliştirmişlerdir. Ayrıca, aynı çalışmada buton keskilere için optimum kazı parametrelerinin (normal ve yuvarlanma kuvvetleri, keskilere arası mesafe-kesme derinliği oranı ve spesifik enerji) belirlenmesi amacıyla tepe eğimi indeksine dayalı yeni modeller önerilmiştir. Böylece uç batırma deneylerinin yalnızca penetrasyon (kazı hızı) tahminiyle sınırlı olmayıp kesme verimliliğinin optimizasyonu konusunda da kullanılabilen ortaya konulmuştur.

Bu çalışmadan elde edilen farklı indeksler (ortalama eğim, tepe eğimi, ortalama kuvvet eğimi ve uç batırma iş indeksleri), özellikle de

tepe eğimi indeksi kullanılarak, BDM'lerinin operasyonel ve performans parametrelerinden çekme kuvveti ve anlık kazı hızı gibi parametreler tahmin edilebilmektedir. Konik uçla yapılan deney sonuçları (indeksler) elde edildikten sonra, Denklem (7-10) kullanılarak, ilgili indeksler buton uç indekslerine dönüştürülür. Elde edilen buton uç indekslerine göre Shaterpour-Mamaghani vd. (2022, 2023) tarafından önerilen deterministik modeller kullanılarak, buton keskilere ve BDM'lerinin performansına ilişkin temel parametreleri (örneğin normal kuvvet, yuvarlanma kuvveti, genişletme kafası torku ve baskı kuvveti, birim penetrasyon, optimum kesme koşulları, spesifik enerji) tahmin edilebilir.

Burada dikkat edilmesi gereken konu, dönüşüm nedeniyle tahmin hassasiyetinin bir miktar azalacağıdır. Eğer herhangi bir uç batırma deneyi yapılamamışsa, bu durumda, gerek bu çalışmada verilen Denklem (11-14) gerekse de Shaterpour-Mamaghani vd. (2023)'de verilen kayaçların fiziksel-mekanik özellikleri ile ilişkilendirme yapılarak performans tahmini yapılabilir. Burada belirtilmelidir ki Shaterpour-Mamaghani vd. (2021, 2022, 2023)'de kayaç özellikleri doğrudan kazı makinesi (BDM) performansı ile ilişkilendirilmiştir, dönüşüm yapmadan da performans tahmini yapılabilir.

Önerilen modellerde kullanılan parametrelerin alt ve üst sınırları dikkate alınmalıdır. Modeller yalnızca beş kayaç örneği üzerinden geliştirilmiştir. Modellerin güvenilirliklerinin artırılması için ek çalışmalarla desteklenmesi gerekmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada buton uç batırma deneylerinden elde edilen ortalama eğim, tepe eğimi, ortalama kuvvet eğimi ve uç batırma iş indekslerinin, buton uç batırma deneyi yapılamadığı durumlarda, konik uç batırma

deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak tahmin edilebileceği gösterilmiştir. Buna bağlı olarak, buton uç batırma deneyleri kullanılarak geliştirilen başyukarı delme makinelerinin performanslarının, konik uç kullanılıp, sonuçları buton uçların sonuçlarına dönüştürülmesinden sonra tahmin edilebileceği de ortaya konmuştur. Ayrıca, konik uç ile de uç batırma deneyi yapılmadığında, kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinden istenen indekslerin tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada sözü edilen modeller sınırlı sayıda veri seti kullanılarak geliştirildiğinden, sonuçların dikkatli yorumlanması gerekmektedir. İlerleyen çalışmalarda veri sayılarının artırılmasıyla bu modellerin yeniden değerlendirilmesi ve böylece daha güvenilir ve daha genellenebilir modeller geliştirilmesi gerekmektedir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Aydın Shaterpour-Mamaghani'nin Doktora Tez çalışmasının bazı kısımlarını içermektedir. Yazarlar, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) 217M729 Projesi kapsamında verdiği mali destek için teşekkürü borç bilir. Yazarlar, Esan Eczacıbaşı (Balya Kurşun-Çinko Madeni), DSİ Çoruh Projeleri 26. Bölge Müdürlüğü Artvin, Limak-Cengiz-Kolin Ortaklığı ve Sargın İnşaat ve Makine Sanayi Ticaret A.Ş.'ye verdikleri destekler için teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Abu Bakar, M.Z. 2012. Saturation effects on mechanical excavatability of roubidoux sandstone under selected rock cutting tools, Missouri University of Science and Technology, Doctoral Dissertation, 490p, USA.

Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B., Molaghab, A.,

Mohammadian, A. 2018. Development of a new rock drillability index for oil and gas reservoir rocks using punch penetration test. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 166, 131-145. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.024

ASTM D2845, 2008. Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. American Society for Testing and Materials.

Bilgin, N. 1989. Applied rock cutting mechanics for civil and mining engineers. 1st ed. Birsen, Istanbul (In Turkish), 200s.

Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C. 2014. Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries. First edition. CRC Press, New York, 388p.

Çopur, H. 1999. Theoretical and experimental studies of rock cutting with drag bits toward the development of a performance prediction model for roadheaders. Colorado School of Mines, Doctoral Dissertation, USA, 395p.

Çopur, H., Balcı, C., Tumaç, D., Erdoğan, T., Doğan, E., Shaterpour-Mamaghani A. 2022. Başyukarı Delme Makinelerinin (BDM) Performanslarının Tahmini ve Optimizasyonu. TÜBİTAK 1001, Proje No: 217M729. İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü.

Çopur, H., Bilgin, N., Tunçdemir, H., Balcı, C. 2003a. A set of indices based on indentation tests for assessment of rock cutting performance and rock properties. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 589-599.

Çopur, H., Tunçdemir, H., Balcı, C., Öztürk, A. 2003b. Kayaçların Kırılabilirliğini Etkileyen Parametrelerin Kazı Mekaniği Bakımından İncelenmesi. TÜBİTAK Proje No: İNTAG-

721. İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü.
- Dollinger, G.L. 1978. Lab tests provide low-cost method for predicting raise boring costs. *Engineering & Mining Journal*. 179, 86-89.
- Dollinger, G.L., Handewith, H.J., Breeds, C.D. 1998. Use of the punch test for estimating TBM performance. *Tunnelling and Underground Space Technology* 13 (4), 403-408. DOI: 10.1016/S08867798(98)00083-2
- Erben, H. Punch penetration tests-input parameter for TBM performance prediction. Montanuniversität Leoben, Master of Science Dissertation, Austria, 89p.
- Fowell, R.J., Smith, I.M. 1976. Factors influencing the cutting performance of selective tunnelling machine. *Int. Tunnelling 76 Symp.*, 1-5 May., London, 301-318.
- Gertsch, R.E. 2000. Rock toughness and disc cutting. University of Missouri-Rolla Doctoral Dissertations, USA, 256p.
- Handewith, H.J. 1970. Predicting the economic success of continuous tunneling in hard rock. *CIM Bull.* 63, 595-599.
- ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay R, Hudson JA (eds) Suggested methods prepared by the ISRM commission on testing methods, p. 628.
- Jeong, H.Y., Cho, J.W., Jeon, S., Rostami, J. 2016. Performance assessment of hard rock TBM and rock boreability using punch penetration test. *Rock Mechanics Rock Engineering*. 49 (4), 1517-1532. DOI:
- Rock Mechanics and Rock Engineering 17, 97-112.
- McFeat-Smith, I., 1977. Rock property testing for the assessment of tunnelling machines performance. *Tunnels Tunnelling* March 29-33.
- Shaterpour-Mamaghani, A., Çopur, H. 2021. Empirical prediction of reaming performance of raise boring machines based on pilot hole drilling performance, raise Inclination and rock properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 1707-1730. DOI: 10.1007/s00603-020-02355-1
- Shaterpour Mamaghani, A., Çopur, H., Gümüş, A., Tumaç, D., Balcı, C., Erdoğan, T., Doğan, E., Koçbay, A., 2022. Full-Scale Linear Cutting Tests using a Button Cutter and Deterministic Performance Prediction Modeling for Raise Boring Machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 127, 104609. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104609
- Shaterpour-Mamaghani, A., Çopur, H., Balcı, C., Tumaç, D., Koçbay, A., Doğan, E., Altıntaş, E., Erdoğan, T., Şirin, O., Gümüş, A. 2023. Suggestion of new models for predicting performance of raise boring machines based on indentation tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 138, 105181. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105181
- Yağız, S. 2009. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 24, 66-74. DOI: 10.1016/j.tust.2008.04.002
- Lindqvist, P.A. 1984. Stress fields and subsurface crack propagation of single and multiple rock indentation and disc cutting.