

Mekanize kazı makinalarının seçiminde küçük ve tam boyutlu kazı deneylerinin karşılaştırılması

Cemal BALCI*, Nuh BİLGİN

İTÜ Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu makalede, mekanize kazı makinalarının kazı hızlarının önceden kestirilebilmesi için spesifik enerji değeri, hem küçük hem de tam boyutlu kazı seti kullanılarak elde edilmiştir. Spesifik enerji değeri, mekanize kazı makinalarının verimliliğinin tahmin edilmesinde, en geçerli metotlardan biridir. Bu değer, laboratuvarında küçük ve tam boyutlu kazı setlerinde, kaya kesme deneyleri yapılarak elde edilmektedir. Bu amaçla, farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip kaya, mineral ve cevher numuneleri üzerinde, hem küçük hem de tam boyutlu kazı seti kullanılarak, kaya kesme deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sırasında, keskilere gelen kuvvetler ve spesifik enerji değerleri ölçülmüştür. Küçük ve tam boyutlu kazı deneylerinden elde edilen spesifik enerji değerleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Ayrıca, kayaların mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiş, elde edilen spesifik enerji değerleri ile olan ilişkileri istatistiksel olarak analiz edilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Spesifik enerji, mekanize kazı, kayaç kesme, kazı hızı.

Comparison of small and full scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines

Abstract

In this article, the statistical analysis are developed in order to predict the efficiency of mechanical excavators (Roadheaders, continuous miners, shearers etc.) by using laboratory specific energy values. Specific energy is defined as the amount of energy required to break a unit volume or weight of rock expressed in kWh/m³ or MJ/m³. Specific energy criterion uses machine installed head power, total system efficiency and the specific energy required for cutting a particular rock type with a certain type of tool. This value can be derived from small and full-scale laboratory rock cutting experiments at different cut spacings and depths. For this purpose small and full-scale (Linear cutting machines) rock cutting experiments were performed on rock samples obtained from 18 different types of rocks (Sandstone, Mudstone, Shale, several Volcanic Rocks, Chromites, Trona, and Copper). Cutter forces acting on a cutter in three directions and, specific energy values were measured during testing. In addition, all physical property testing were carried out and relationships between specific energy values obtained from small and full-scale rock cutting tests and rock mechanical properties were analyzed using the method of least squares regression analysis. Statistical analyses showed that specific energy values obtained from full scale rock cutting tests can be predicted from small scale rock cutting tests and rock mechanical properties to select most efficient mechanical excavators.

Keywords: Specific energy, mechanical excavation, rock cutting, cutting rate.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Cemal BALCI. cemalb@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 61 38.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Maden Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Mekanize kazı makinalarının seçiminde küçük boyutlu kazı deneylerinin karşılaştırılması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 14.05.2004 tarihinde dergiye ulaşmış, 02.06.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.10.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Günümüzde mekanize kazı yapan kayaç ve kömür kesme makineleri, inşaat ve madencilik sektöründe önemli bir kullanım alanına sahiptir. Bu tür makineler kısmi cepheli (galeri açma makineleri) ve tam cepheli tünel açma makineleri olmak üzere genelde iki ana gruba ayrılmaktadır. Kademeli kazı yapan makineler ilk kullanıldıkları yıllara nazaran, günümüzde büyük teknolojik gelişmelere uğramışlardır. Masif formasyonlarda üst kullanım sınırı 500 kg/cm^2 iken bugün bu sınır 1000 kg/cm^2 'ye kadar çıkmıştır. Kırıklı ve çatlaklı formasyonlarda ise $1500\text{-}1600 \text{ kg/cm}^2$ 'ye kadar basınç dayanımına sahip kayaçlar ekonomik olarak kazılabilmektedir. Bu makineler kesici kafanın hareket şekline bağlı olarak; arına dik (spiral) ve paralel (tambur) olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Bu tür makineler madencilik ve inşaat sektörlerinde, hazırlık galerisinin açılması, cevher üretimi, demiryolu, karayolu, baraj ve metro tünellerinin açılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tam cepheli tünel açma makinelerinin ilk uygulamaları kademeli kazı yapan makinelerden daha sonra gelişmiş ve kullanım alanları artmıştır. Bu tür makineler en sert kayaçlarda bile başarı ile kullanılmaktadır. 7 m çapında bir tam cepheli kazı makinesi ile basınç dayanımı 2500 kg/cm^2 olan bir granit formasyonunda, kolaylıkla 7-8 m/gün kazı hızlarına ulaşabilmektedir. Tam cepheli kazı makinelerinin manevra kabiliyetlerinin düşük ve pahalı oluşları nedeniyle daha çok uzun ve düz tünellerin kazısında uygulama alanı bulmaktadırlar.

Son yıllarda madencilik faaliyetlerinde açık işletme yöntemi ile üretilebilen cevherlerin hızla tükenmesi, bu faaliyetleri yeraltı maden işletmeciliğine kaydırmaktadır. Dünyada diğer madencilik şirketleri ile rekabet edebilmek, madencilik faaliyetlerini daha verimli ve ucuza yapabilmek için insan gücünü en aza indiren hızlı mekanize kazı sistemlerini kullanmak günümüzde kaçınılmazdır. Gelişmiş ülkelerde metro, doğal gaz, elektrik, su ve kanalizasyon tünellerinin yanında, madencilik faaliyetlerinde de bu tür makineler yüksek oranda kullanılmaktadır. Ülkemizde de mekanize kazı sistemlerin madencilik ve inşaat sektöründe kullanılması hızla artmaktadır.

İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa gibi büyük kentlerimizde yapımına başlanan metro çalışmalarında, madencilik faaliyetlerinde, kazı makineleri kullanılmakta ve yüksek verimlilik elde edilmektedir.

İlk yatırım maliyetleri çok yüksek olan inşaat ve madencilik çalışmalarında, yatırımı yapacak olarak girişimci, projenin bitim süresini kestirmek istemektedir. Eğer bu bir metro çalışması ise ihalede belirtilen işin bitim süresinin, eğer bir madencilik faaliyeti ise ne kadar üretim yapabileceğinin ve maliyetlerinin bilinmesi zorunludur. Bu nedenle mekanize kazı sistemlerinde, kazı performansının güvenli bir şekilde kestirimi çok önemli olmaktadır. Kazı performansının kestirimi; teknik, ekonomik olarak uygulanabilirliğin ve kazı hızlarının kestirimi olarak tanımlanabilir ve kazı işlerinin ekonomikliğini hayati derecede etkilemektedir. Bu da mekanize kazı sistemlerinde kullanılacak makinenin seçiminin kaya kütlesi ile çevre özelliklerine uygun olarak yapılmasını ve bu tür makinelerin verimli bir şekilde çalışmasını sağlamakta ve mekanize kazıyı diğer kazı sistemlerine nazaran avantajlı duruma getirmektedir. Makina, kazı yapılacak formasyonun özelliklerine göre seçilmez ve dizayn edilmez ise; birçok sorunlarla karşılaşılır hatta bazı durumlarda kazı sistemi değiştirilmek zorunda kalınır. Bunun için kullanılacak makinenin seçimi çok önemli olmakta ve işe başlamadan önce kesilecek formasyonun kazılabilirlik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bugün bu konuda ne yazık ki herkesin kabul ettiği standart bir kazılabilirlik tayin yöntemi yoktur. Uygulamalardan elde edilen tecrübeler ve bu tür makinelerden daha verimli sonuçlar alınabilmesi için yapılması gerekenler hakkında, konunun uzmanları tarafından, ISRM'de (Uluslararası Kaya Mekaniği Cemiyeti) 1987'de toplanan bir komisyonda detaylı görüşülmüş ve bazı tavsiye kararları alınmıştır (Bamford vd., 1987).

Bu tavsiye kararlarından bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Dayanım özelliklerini irdeleyen test yöntemleri (Basınç dayanımı, çekme dayanımı, kesme dayanımı ve nokta yük deneyi testleri)

- Aşındırıcılık özelliklerini irdeleyen test yöntemleri (Kayacın mineral içeriğinin saptanması, tane boyutunun saptanması, çimentolanma derecesinin saptanması, Cerchar aşındırıcılık testi, Schimazek aşındırıcılık testi)
- Kırılgenlik ve dayanım özelliklerini irdeleyen test yöntemleri (Shore Scleroscope ile plastik sertlik testi, koni delici, uç batırma testi, darbe dayanımı testi, Schmidt çekici testi)
- Yerinde yapılan kazılabilirlik deneyleri
- Laboratuvar kesme deneyleri

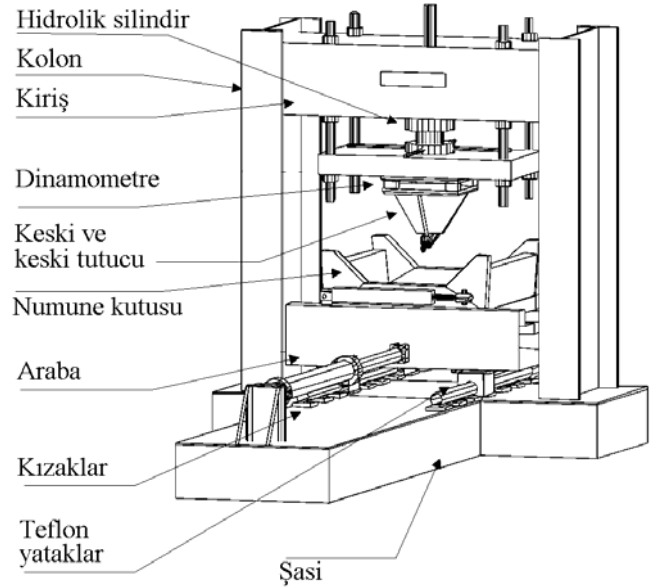
Mekanize kazı makinalarının hızlarının basit ve ucuz yöntemlerle, tahmin edilebilmesi kazı mekaniği bilimi açısından oldukça yeni ve önemlidir. Tam boyutlu doğrusal kazı seti deneyi kullanılarak yapılan kayaç kesme deneylerinde, birim hacimdeki kayacı kesmek için gereken spesifik enerji değeri gerçeğe yakın bir şekilde bulunabilmektedir. Bu değer mekanize kazı makinalarının kazı hızı tahmininde kullanılır. Mekanize kazı sistemlerinin seçimi ve tasarımı aşamasında, kullanılacak olan formasyonlardan kaya blokları alınmakta ve laboratuvarında tam boyutlu kazı setinde kaya kesme deneylerine tabi tutulmaktadır. Ancak bu tür laboratuvar olanaklarının her yerde bulunmaması ve uzman kişilere ihtiyaç duyulması bu tür sistemlerin maliyetini artırmaktadır. Özellikle tam boyutlu kazı setinin kullanılmadığı durumlarda, optimum ve yardımsız spesifik enerji değerlerinin küçük boyutlu kazı seti kullanılarak tahmin edilebilmesi kazı mekaniği bilimi için önemli bir yer tutmaktadır.

Bu çalışmada mekanize kazı sistemlerinin kazı hızını tahmin etmekte kullanılan spesifik enerji değerleri, küçük ve tam boyutlu kazı deneyleri yapılarak bulunmuştur ve regresyon analizi ile her iki deney setinden bulunan değerler arasındaki ilişkiler çeşitli kesme koşulları için araştırılmış ve modeller geliştirilmiştir. Bu modeller yardımı ile oluşturulan tahmin yöntemleri, özellikle son 30 yılda gelişen kazı mekaniği bilimine kuşkusuz önemli katkılar sağlayacaktır.

Spesifik enerji ve kayaç özelliklerinin belirlenmesi

Tam boyutlu doğrusal kazı seti deneyleri

Birim hacimdeki kayacı kesmek için gerekli olan spesifik enerji tam boyutlu doğrusal kazı seti kullanılarak elde edilmiştir. Bu tür deneylerin yapılabildiği tam boyutlu bir kazı seti NATO-TU Excavation projesi kapsamında İTÜ Maden Fakültesi, Maden Kazı ve Teknolojisi Laboratuvarlarında inşaa edilmiştir (Şekil 1). Doğrusal kazı seti ana gövde, numune kutuları, keski tutucuları, dinamometre ve çeşitli elektronik aygıtlardan oluşur ve yaklaşık 12 ton ağırlığındadır. Ana gövde, kolonlar, kiriş, keski tutucusu bağlama sistemi, kızaklar üzerinde hareketli araba, numune kutusunu hareket ettiren iki küçük hidrolik silindir ve arabayı iten büyük bir hidrolik silindirden oluşur. Aletin boyutları 6500 x 3000 x 3400 mm'dir. 0.7 x 0.7 x 1 m. boyutlarındaki test edilecek kayaç, numune kutusuna beton yardımı ile sabitlenmektedir.



Şekil 1. Tam boyutlu doğrusal kazı seti

Küçük boyutlu kazı deneyleri

Küçük boyutlu kesme deneylerinin yapılabileceği deney setinin bir benzeri İTÜ Maden Fakültesi Maden Kazı ve Teknolojisi Laboratuvarlarında mevcuttur. Bu deney seti 18 kW'lık bir elektrik motoru ile tahrik edilen bir planya makinesidir. Planyanın kayaç numunesi yerleştirilecek sehpa sınır boyutları 30x40x50 cm

boyutlarındadır. Kaya kesme esnasında keskiye gelen kuvvetleri ölçmek için dinamometre kullanılmıştır ve bu sistem 10 tonluk kesme kuvvetinin ölçülmesine olanak tanımaktadır (Şekil 2). Deney esnasında, kayaç numunesi planyanın sehpasına sabitlenir ve aşağı-yukarı, sola-sağa hareket ettirilerek, kesme derinliği, keskiiler arası mesafe gibi parametrelerin etkileri incelenebilmektedir (McFeat-Smith ve Fowell, 1977; Bilgin ve Shahriar, 1987)



Şekil 2. Küçük boyutlu kazı deney seti

Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Kesme deneylerine tabi tutulan kayaçların mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemek için tek eksenli basınç ve çekme dayanımı, Schmidt çekici deneyi, dinamik ve statik elastik modül değerleri, sismik hız deneyi ve yoğunluk deneyleri yapılmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi kazılabilirliğin saptanmasında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Deneylerde numune çapı yaklaşık 54 mm ve numune boy/çap oranı 2.1 –2.5 arasında olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan silindirik numuneler hidrolik basınç deneyi presinde kırılmıştır. Yükleme hızı olarak 0.5 kN/sn alınmıştır. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı kırılmadan önceki basma yükünün, basılan yüzey alanına bölünmesi şeklinde hesaplanmıştır. Basınç dayanımı deneylerinde kullanılan numuneler ultrasonik dalga hızı deneylerinde de kullanılmıştır. Statik elastik modül değerlerinin hesaplanabilmesi için tek eksenli deneylerin yapıldığı pres kullanılmıştır. Bu deneylerde statik elastik

modülünün bulunması için gerilme-birim deformasyon eğrileri kullanılmıştır. Bu eğriler yardımı ile tanjant elastik modül değerleri hesaplanmıştır.

Kayaç numunelerinin dolaylı çekme dayanımları Brazilian Deneyi olarak bilinen yöntem ile bulunmuştur. Deneylerde numune çapı yaklaşık 54 mm ve numune boy/çap oranı 0.5-0.75 arasında olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan silindirik numuneler hidrolik preste kırılmıştır. Yükleme hızı olarak 0.2 kN/sn alınmıştır.

Kayaçların yüzey sertlik özelliklerini belirlemek için geri tepmeli çekiç olarak adlandırılan Schmidt çekici deneyi kullanılmıştır. N-24 ve L-9 tipi iki farklı geri tepmeli çekiç kullanılarak deneyler yapılmıştır. N-24 tipi çekiç 2.207 Nm, L-9 tipi çekiç ise 0.735 Nm geri tepme enerjisine sahiptir. Bu nedenle, iki tip çekiçle aynı kaya üzerinde ayrı ayrı deney yapıldığında farklı sonuçlar alınmaktadır. Bu çalışmada kaya numunesi üzerindeki farklı noktalara yirmi adet vuruş yapılmış ve en yüksek değer aritmetik ortalaması geri tepmeli çekiç sonucu olarak uzaklık, en az geri tepmeli çekiç ucunun çapı kadar olmalıdır. Bu konuda ayrıntılı çalışmalar Gökten ve Ayday (1993), Bilgin ve diğerleri (2002) tarafından yapılmıştır.

P ve S dalgalarının ölçümünde laboratuvar ölçeğinde kayaçlar için geliştirilmiş dijital göstergeli C. N. S. Elektronik Şirketi (London, U.K.) tarafından üretilen PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) deney aleti kullanılmıştır. Bu dalga hızlarından yararlanılarak numunelerin dinamik elastik modülü hesaplanmaktadır.

Tek eksenli basınç deneyinde kullanılmak üzere hazırlanan kayaç numuneleri hassas terazide tartılarak numunelerin ağırlıkları bulunmuştur. Numunelerin hacimleri hesaplanmış ve buradan kayaçların yoğunlukları elde edilmiştir. Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri deneylerinin toplu sonuçları Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin toplu sonuçları
(Balci ve Bilgin 2001; Kel vd., 2001; Çopur vd., 2001; Demirçin, 2002)

Kayaç Adı	Yoğunluk	Basınç Dayanımı	Çekme dayanımı	Statik Elast. Mod.	Dinamik Elast. Mod.	P dalgası hızı	S1 dalgası hızı	S2 dalgası hızı	Schmidt Çekici	Schmidt Çekici
	(gr/cm ³)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	(km/sn)	(km/sn)	(km/sn)	N-24	L-9
Acıgöl tüfü	1.49	10.3	0.9	1.1	3.8	2.00	1.82	1.83	28	34
Gelveri tüfü	1.70	10.8	1.2	1.4	5.2	2.12	2.00	1.94	42	45
Göstük tüfü	1.80	26.6	2.6	2.4	7.5	2.56	2.15	2.50	31	40
Kızılkaya tüfü	1.71	14.4	1.5	1.6	5.2	*	*	*	39	42
Kızılkaya pembe tüfü	1.71	18.7	2.3	1.3	6.1	2.40	2.22	2.18	38	58
Selime üst tüfü	1.49	5.7	0.2	0.4	2.8	1.73	1.51	1.53	14	13
Stfa Dragos kıltaşı	2.76	57.9	5.6	*	*	*	*	*	52	58
Kumtaşı 1	2.65	113.6	6.6	17.0	36.5	3.74	2.52	2.32	53	60
Kumtaşı 4	2.67	87.4	8.3	33.3	55.0	5.20	2.80	2.73	52	59
Silttaşı 5	2.65	58.0	5.3	30.0	48.8	4.95	2.67	2.45	48	55
Kireçtaşı	2.72	121.0	7.8	57.0	37.9	3.91	3.01	2.85	55	62
Kumtaşı 2	2.67	173.7	11.6	28.0	62.2	5.33	3.04	2.80	57	63
Tüvenan ros1	4.03	32.2	3.7	3.5	31.2	3.48	3.33	3.11	30	39
Tüvenan ros2	3.39	46.9	4.5	2.3	76.4	5.83	3.41	3.37	43	45
Kavak cevheri	2.88	46.5	3.8	2.9	35.2	4.48	3.13	2.54	43	52
Serpantin	2.49	38.1	5.7	2.3	13.9	2.96	2.48	2.42	52	61
Harsburgit	2.65	57.7	5.5	2.1	16.1	3.14	2.64	2.59	50	61
Trona U4	2.13	29.7	2.2	3.4	38.4	4.93	3.82	3.21	39	39

*:Ölçüm yapılmadı.

Küçük ve tam boyutlu kazı setlerinden spesifik enerji değerlerinin elde edilmesi

Kaya kesme esnasında oluşacak kuvvetleri ölçmek için küçük ve tam boyutlu kazı setlerinde üç eksenli dinamometre kullanılmıştır. Dinamometrede birim deformasyonları ölçmek için gerilim ölçerler (strain gauge) yerleştirilmiştir. Tam boyutlu kazı setinde, dinamometreye keski tutucu yardımı ile sabitlenen S35/80H tipli kalem uçlu keski Sandvik firmasından temin edilmiştir. Tüm tam boyutlu kazı deneyleri boyunca kalem uçlu keskinin, temizleme açısı 17°, dalma açısı 55-56° kesme hızı 12.7 cm/sn ve data toplama hızı 2000 Hz olmak üzere sabit tutulmuştur.

Küçük boyutlu kazı setinde tüm kazı deneyleri 12.5 mm genişliğinde standart keski, temizleme açısı 5°, kesme açısı -5°, kesme hızı 18 cm/sn ve data toplama hızı 2000 Hz olmak üzere sabit tutulmuştur. Veri erişim sistemi olarak, kesme esnasında ortaya çıkan milivolt seviyesindeki sinyaller bir anaalog-dijital I/O bilgisayar kartına beslenmekte ve bir bilgisayar aracılığı ile toplanmaktadır. Bilgisayardan alınan bu sinyaller

kazı mekaniği prensipleri doğrultusunda değerlendirilmekte ve kuvvetler hesaplanmaktadır .

Küçük ve tam boyutlu doğrusal kazı setlerinde yapılan kaya kesme deneylerinde elde edilen verilere dayanarak spesifik enerji aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmıştır (Bilgin, 1989).

$$SE = \frac{FC_{ort}}{Q} \quad (1)$$

Burada :

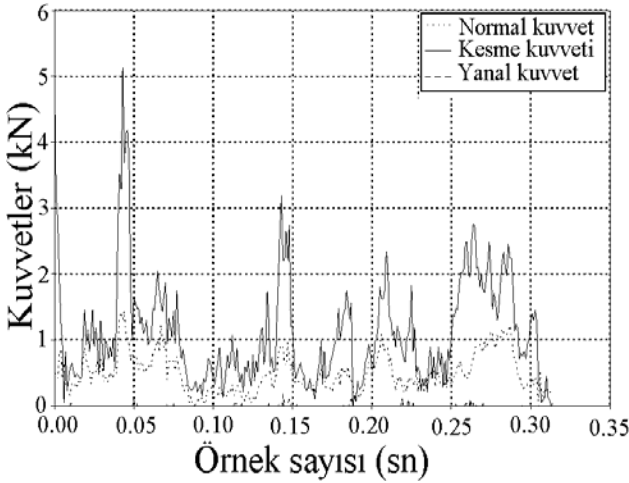
FC_{ort} (kN); ortalama kesme kuvveti; kesme doğrultusunda keskiye gelen tüm kuvvetlerin ortalamasıdır.

Q (m³/km); birim kesme mesafesinde açığa çıkan pasa hacmidir. Kayacın yoğunluğu bilindiğine göre pasa hacmi hesaplanabilmektedir.

Kaya kesme deneyleri sırasında keskiye gelen kuvvetler Şekil 3'teki gibidir. Kesme esnasında kayacı bir parça kopana kadar keski kuvveti artmakta, kayacın kopuktan sonra kuvvet azalmakta ve tekrar artmaktadır. Maksimum kuvvetlerin ortalaması maksimum pik kuvvetleri,

eğrinin altında kalan kuvvetlerin ortalaması ise ortalama kuvvetleri vermektedir.

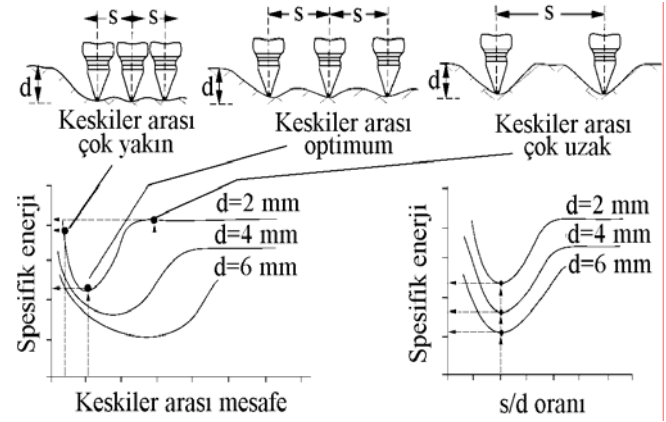
Spesifik enerji değerleri, küçük ve tam boyutlu deney setlerinde belirlenen kesme derinliği (d) ve keskiiler arası mesafeye (s) bağlı olarak hesaplanmıştır. Kazı makinalarının kesici kafasındaki keskiiler, kaya kesme esnasında birbirlerini etkileyerek kazı işlemini yapmaktadırlar. İki keski arasında öyle optimum bir mesafe vardır ki bu mesafede keskiiler arasında kalan kayaç kırılmaktadır. Burada kesme derinliğine bağlı olarak optimum bir keskiiler arası mesafe vardır (optimum s/d oranı) ve bu değerde spesifik enerji değeri minimum olmaktadır. Belli bir s/d oranından sonra keskiiler birbirlerini etkilememekte (yardımsız) ve spesifik enerji değeri maksimum olmaktadır (Şekil 4). Laboratuvar koşullarında elde edilen spesifik enerji değerleri, mekanize kazı makinalarının yerinde kaya kesmede kullandığı enerji ile hemen hemen aynıdır.



Şekil 3. Kaya kesme deneyleri sırasında keskiye gelen kuvvetlerin görünümü

Kesme derinliği 5 ve 9 mm'de yapılan küçük ve tam boyutlu kesme deneylerinden elde edilen laboratuvar optimum spesifik enerji değerlerinin toplu sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Kesme derinliği 5 mm'de numune yetersizliği nedeni ile bazı deneyler yapılamamıştır (Balcı ve Bilgin 2001; Kel vd., 2001; Çopur vd., 2001). Mekanik deneyler ve tam boyutlu kaya kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji değerleri

İTÜ Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kazı Mekanizasyonu Grubunun ortak çalışmalarının sonucudur. (Balcı ve Bilgin 2001; Çopur vd., 2001; Kel vd., 2001; Demirçin, 2002).

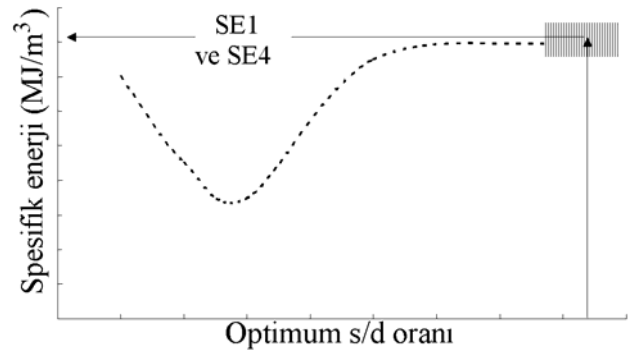


Şekil 4. Keskiiler arası mesafe ile spesifik enerji arasındaki hipotetik eğri (Speight, 1997)

Küçük ve büyük boyutlu kazı deneylerinde kullanılan değişkenlerin tanımı

• Spesifik Enerji Değerleri SE1 ve SE4

Küçük ve tam boyutlu kazı setinde $d=5$ mm ve $d=9$ mm kesme derinliğindeki yapılan deneylerden elde edilen yardımsız spesifik enerji değerleridir, SE4 (tam boyutlu) ve SE1 (küçük boyutlu) olarak tanımlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Optimum s/d arasındaki yardımsız spesifik enerjinin (SE1 ve SE4) tanımı

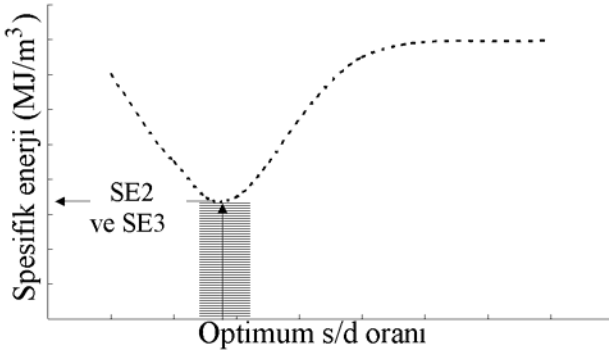
• Spesifik Enerji Değerleri SE2 ve SE3

Küçük ve tam boyutlu kazı setinde $d=5$ mm ve $d=9$ mm kesme derinliğindeki yapılan deneylerden elde edilen optimum s/d 'deki spesifik enerji değerleridir, SE2 (tam boyutlu) ve SE3 (küçük boyutlu) olarak tanımlanmıştır (Şekil 6).

Tablo 2. Küçük ve tam boyutlu kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji değerlerinin toplu sonuçları

Kayaç Adı	SE1 (MJ/m ³)		SE3 (MJ/m ³)		SE2 (MJ/m ³)		SE4 (MJ/m ³)	
	d= 5 mm	d= 9 mm	d= 5 mm	d= 9 mm	d= 5 mm	d= 9 mm	d= 5 mm	d= 9 mm
Acıgöl tüfü	10.48	9.51	7.23	7.1	8.14	6.45	12.13	8.12
Gelveri tüfü	15.14	14.37	10.2	8.83	17.00	11.49	31.66	22.03
Göstük tüfü	26.57	24.25	18.45	17.6	15.92	9.28	18.86	11.13
Kızılkaya tüfü	15.35	13.8	12.24	7.38	15.38	9.79	22.21	10.45
Kızılkaya pembe tüfü	28.52	24.82	17.28	15.67	16.08	10.27	18.89	10.96
Selime üst tüfü	5.48	6.49	4.87	4.11	4.81	4.72	7.82	5.78
STFA Dragos kıltaşı	49.72	43.07	32.25	29.54	10.24	16.71	11.81	28.39
Kumtaşı 1	82.08	*	46.18	*	63.45	45.4	84.25	46.00
Kumtaşı 4	86.43	*	39.66	*	*	19.67	*	26.87
Silttaşı 5	59.10	*	43.87	*	*	35.10	*	44.85
Kireçtaşı	70.50	*	50.61	*	*	42.75	*	62.77
Kumtaşı 2	67.22	*	63.56	*	*	55.55	*	93.64
Tuvönan ros1	7.18	*	5.24	*	33.46	13.87	40.02	20.78
Tuvönan ros2	27.22	*	23.93	*	45.94	22.86	53.17	31.10
Kavak cevheri	32.38	*	25.86	*	37.44	17.82	43.71	39.69
Serpantin	38.69	*	22.74	*	25.28	21.82	34.21	30.80
Harsburgit	49.20	*	27.43	*	52.5	39.73	66.83	32.10
Trona	19.88	12.93	14.02	9.21	21.53	9.62	31.88	24.04

*:Ölçüm yapılmadı.



Şekil 6. Optimum s/d arasındaki hipotetik eğride optimum spesifik enerjinin (SE2 ve SE3) tanımı

Spesifik enerji değerinden kazı hızı tahmin yöntemi

Mekanize kazı makinalarının performansını ölçmede kullanılan terimlerden en önemli olanları aşağıda açıklanmıştır.

• İlerleme miktarı (mm/devir): Kesici kafanın bir dönüşteki ilerleme miktarı olarak tanımlanmaktadır.

• Makinadan faydalanma oranı (%): Bir günde veya vardiyadaki kazı makinasının çalışma yüzdesidir.

• Makina ölü zamanı (%): Bir günde veya vardiyadaki diğer işlerden kaynaklanan duraklamaların yüzdesi.

• Ortalama ilerleme hızı (m/saat): Net kesme hızından hesaplanır ve makinadan faydalanma ve ölü zamanlarını içermektedir

• Net kazı hızı (m³/saat veya ton/saat): Birim zamandaki kesme sonucu açığa çıkan pasadır.

Mekanize kazı makinalarının kazı hızlarının önceden tahmini için kullanılan spesifik enerji yöntemi günümüzde de önemli ölçüde kullanılmaktadır. Colorado School of Mines'da Dr. Özdemir'in başkanlığında geliştirilen bu yöntem gerçek boyutlu bir keski ile kaya bloğunun kesilmesi ve gerekli spesifik enerjinin hesaplanması esasına dayanmaktadır. Teorik olarak, net ilerleme hızı, makina kesme gücü ve optimum spesifik enerji arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur (Rostami vd., 1994).

$$\text{Net kazı hızı (m}^3\text{/saat)} = Kx \frac{P}{SE} \quad (2)$$

Burada:

P = Kurulu kesici kafa gücü (kW),
SE = Optimum spesifik enerji (kWh/m³),
K = Kesici kafa gücünün kayaca iletilme oranıdır

Bu bağıntıda K oranı makina tipine bağlı olarak değişen bir katsayıdır ve Tablo 3'te verilmiştir. Optimum spesifik enerji ise tam boyutlu kesme deneylerinden elde edilmektedir.

Tablo 3. Bazı mekanize kazı makinalarının kesici kafa gücünü kayaca iletilme oranları (Rostami vd., 1994)

Makina Tipi	Oranlar
Kademeli galeri açma makinası	0.45-0.55
Tam cepheli tünel açma makinası	0.85-0.90
Kuyu açma makinaları	0.60-0.70
Tamburlu kesiciler	0.70-0.80

Küçük ve tam boyutlu kazı setlerinden elde edilen spesifik enerji değerleri arasındaki ilişkiler

Küçük ve tam boyutlu kaya kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji değerleri, en küçük kareler yöntemi kullanılarak istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Burada esas, dağılım diagramında görülen tüm noktalar için doğruya uzaklıklarının bulunması ve bunların toplamının minimize edilmesidir. Üzerinde durulan değişkenlerden bağımlı değişken y, bağımsız değişken x ise, $y=f(x)$ şeklindeki fonksiyona regresyon denir ve $f(x)$ fonksiyonu doğrusal, parabolik veya üstsel gibi farklı şekiller alabilir (Sahinler, 2000).

$$\text{Doğrusal: } y = ax + b \quad (3)$$

$$\text{Parabolik: } y = ax^2 + b \quad (4)$$

$$\text{Üstsel: } y = ab^x, y = ae^x \quad (5)$$

Doğrusal Regresyon Modeli:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, \quad (6)$$

β_0 : Doğrunun y-eksenini kestiği yer

β_1 : Doğrunun eğimi veya regresyon katsayısı
 ε : Şansa bağlı hata değeridir.

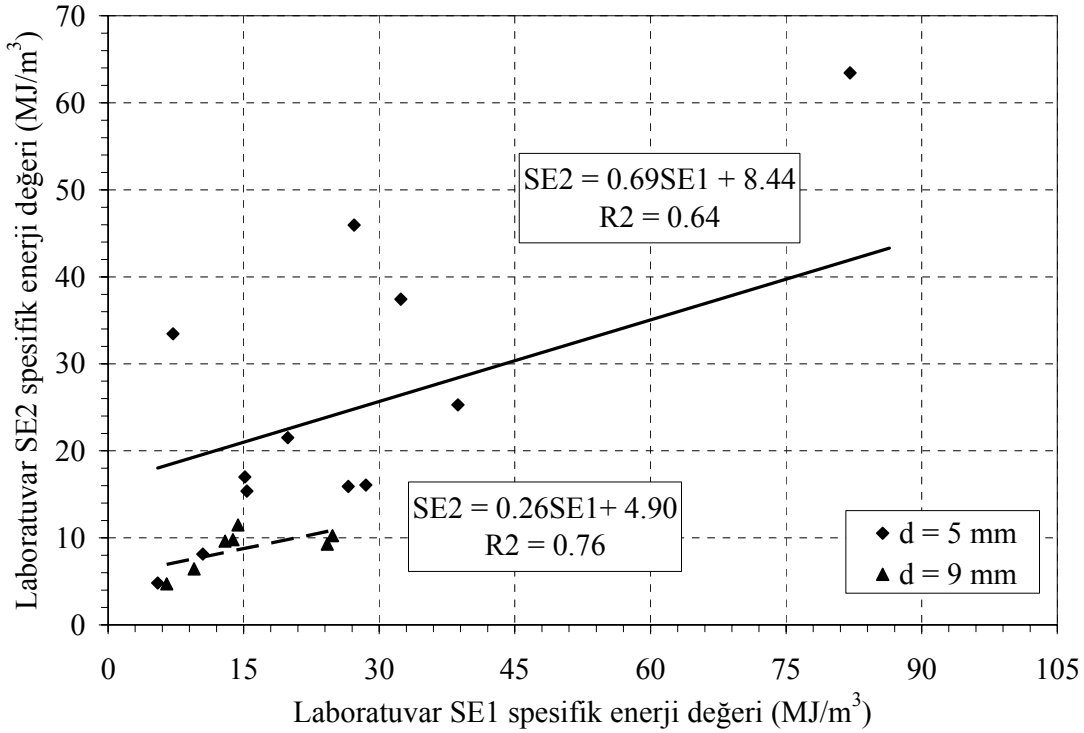
Günümüzde bilgisayar birçok çalışma alanında olduğu gibi özellikle araştırma sonuçlarının istatistiksel değerlendirilmesi aşamasında vazgeçilmez bir araçtır. Bu amaçla birçok istatistik paket programı geliştirilmiştir. Bunlar içerisinde SPSS, SAS, MINITAB, SYSTAT gibi istatistik paket programları ve EXCEL en fazla kullanılanlardan bir kaçıdır. Bu çalışmada istatistiksel araştırmalar için Excel Paket Programı kullanılmıştır. Regresyon analizinde doğrusal ve üstsel fonksiyonlar kullanılarak %95 güvenilirlik sınırında en iyi korelasyon katsayısını veren eşitlikler bulunmuştur.

Bu çalışmada mekanize kazı sistemlerinin kazı hızını tahmin etmekte kullanılan spesifik enerji değerleri, hem tam boyutlu hem de küçük boyutlu kazı setleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu amaçla küçük boyutlu kazı setinden elde edilen spesifik enerji değerleri ile tam boyutlu kazı setinden elde edilen spesifik enerji değerleri arasında istatistiksel araştırma yapılmıştır. İstatistiksel araştırma sonucunda bulunan eşitlikler Tablo 4'de topluca verilmiştir. Eğer tam boyutlu kazı setinde yardımsız koşulda bir deney yapılmış ise aynı kazı setinden elde edilebilecek optimum spesifik enerji değeri Tablo 4'teki eşitlikler yardımı ile tahmin edilebilmektedir.

Bazı durumlarda tam boyutlu doğrusal kazı seti için gerekli olan kaya bloğu temin edilememektedir. Bu bazen büyük bloklar halinde numune almanın zorluğundan bazen de arazinin yapısının buna elverişli olmamasından kaynaklanmaktadır. Küçük boyutlu kazı seti için gerekli numune, tam boyutlu kazı setine göre daha küçük olmakta ve hatta karot numuneler üzerinde bile kesme deneyleri yapılabilmektedir. Bu durum küçük boyutlu kazı setinin avantajıdır. Bu nedenle, küçük boyutlu kazı setinde elde edilen yardımsız spesifik enerji değeri ile tam boyutlu kazı setinden elde edilen optimum spesifik enerji arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak araştırılmış ve sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 4. Küçük ve büyük boyutlu kazı seti ile laboratuvarda elde edilen spesifik enerji değerlerinin, değişik kesme koşullarında, birbirlerine etkisinin istatistik kullanarak tahmini

Kesme Derinliği d = 5 mm	R ²	Kesme Derinliği d = 9 mm	R ²
SE3 = 0.44 x SE2 + 7.62	0.45	SE3 = 1.95 x SE2 - 6.64	0.70
SE4 = 1.26 x SE3 + 10.04	0.43	SE4 = 3.55 x SE3 ^{0.56}	0.38
SE2 = 0.69 x SE1 + 8.44	0.64	SE2 = 2 x SE1 ^{0.55}	0.75
SE4 = 1.22 x SE2 + 1.99	0.97	SE4 = 1.58 x SE2 ^{0.96}	0.86
SE3 = 0.44 x SE1 + 7.62	0.45	SE3 = 1.95 x SE1 - 6.64	0.70
SE3 = 0.95 x SE1 ^{0.91}	0.95	SE3 = 0.69 x SE1 - 0.53	0.98
SE4 = 0.72 x SE1 + 13.21	0.45	SE4 = 0.64 x SE1 ^{0.58}	0.38

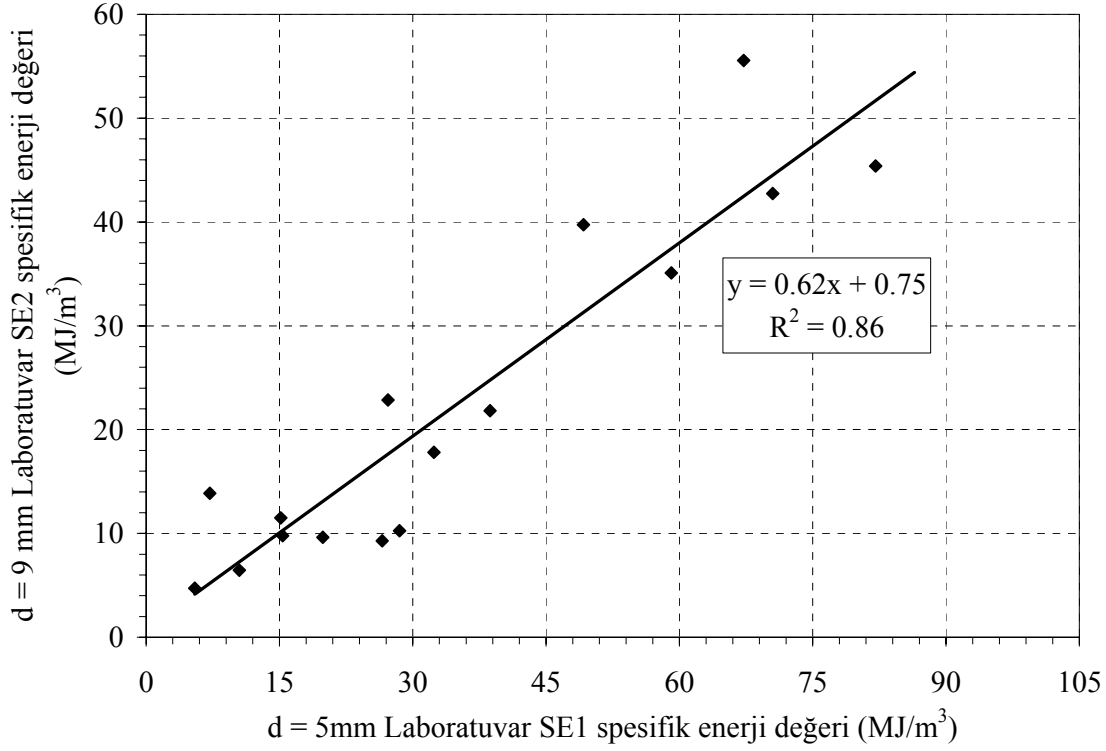


Şekil 7. Kesme derinliği 5 ve 9 m’de küçük boyutlu kazı setinde elde edilen yardımsız spesifik enerji değeri ile tam boyutlu kazı setinden elde edilen optimum spesifik enerjinin tahmini

Kesme derinliği 9 mm’de SE1 değeri yardımı ile tam boyutlu kazı setinde elde edilebilecek optimum spesifik enerji değeri 0.76 gibi yüksek bir korelasyon katsayısı ile tahmin edilebilmektedir. Ayrıca, yardımsız koşulda 5 mm kesme derinliğindeki küçük boyutlu kazı setinden elde edilen spesifik enerji değeri ile optimum koşulda, 9 mm kesme derinliğindeki tam boyutlu kazı setinden elde edilen spesifik enerji değerleri istatistiksel olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8’den görüldüğü gibi, her iki deney setinde farklı kesme koşullarında elde edilen spesifik enerji değerlerinin

arasında (kumtaşı 4 ve Stfa numunesi hariç) 0.86 gibi yüksek korelasyon katsayılı doğrusal lineer bir ilişki mevcuttur.

Küçük boyutlu kazı setinden elde edilen spesifik enerji değeri, uluslararası kaya mekaniği kuruluşunun standart koşullarda öngördüğü şekilde belirlenmiştir. Bu sonuçlar, mekanize kazı makinalarının kazı performansının önceden kestirilmesinde, tam boyutlu kazı setinden elde edilen optimum spesifik enerji değerinin küçük boyutlu kazı seti deneyleri yapılarak tahmin edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 8. Kesme derinliği 5 mm'deki küçük boyutlu kazı setinden elde edilen yardımsız spesifik enerji değeri ile tam boyutlu kazı setinden elde edilen 9 mm kesme derinliğindeki optimum spesifik enerji arasındaki ilişki

Sonuçlar ve tartışma

Spesifik enerji değeri ne kadar düşüğe mekanize kazı makinalarının üretim kapasitesi o kadar yüksek ve verimlidir. Bu amaçla kaya kesme deneyleri spesifik enerjinin hesaplanmasına ağırlık verilerek planlanmıştır. Geliştirilen istatistiksel analizler, tam boyutlu kazı deneylerinden elde edilen deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Madenlerde ve tünel açmada kullanılan mekanize kazı makinalarının performanslarını önceden tahmin etmede kullanılan, spesifik enerji yöntemi en gerçekçi sonuçları vermektedir. Bu yöntemde spesifik enerji değeri tam boyutlu kazı setinden elde edilmektedir. Bu tür deney setlerinin pahalı olması, tecrübeli elemana ihtiyaç göstermesi ve her araştırma merkezinde bulunmaması araştırmacıları ucuz ve pratik yeni yöntemler geliştirmeye zorlamaktadır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar yardımcı ile tam boyutlu kaya kesme setinin kullanılmadığı durumlarda (yeterli büyüklükte kayaç numune-

sinin elde edilememesi) optimum spesifik enerji değerinin, daha ucuz ve pratik olan küçük boyutlu kaya kesme deneyi kullanılarak elde edilebileceğini göstermektedir.

Diğer bir deyişle küçük boyutlu kazı deneyleri ile mekanize kazı makinalarının kazı hızları tahmin edilebilir.

Teşekkür ve katkı belirtme

Yazar, bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasındaki yardımları nedeniyle Yard. Doç.Dr. Hanifi Çopur'a, Murat Ali Demirçin'e Kebire Kel'e ve Hakan Tunçdemir'e teşekkürlerini sunar. Ayrıca, kullanılan deney aletleri, NATO-TU Kazı projesi çerçevesinde tasarımı yapılmış ve kurulmuştur. Bu imkanı sağlayan NATO Science for Stability program yöneticilerine teşekkürü borç bilir.

Kaynaklar

Balcı, C., Bilgin, N., (2001). Estimating the Specific Energy from rock Properties for Selection of

- Rapid Excavation Systems, *MPES Tenth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, November 19-21, New Delhi, India, 393-400.
- Bamford, W.E., (1987). *International Society For Rock Mechanics Commission on rock Boreability, Cuttability and Drillability*, Minutes of the meeting of the Commission, held in Montreal on Thursday, 3 Sep., 1-3.
- Bilgin N., Tuçdemir H., Balcı C., Çopur H., Eskikaya Ş., (2000). A Model to predict the performance of tunneling machines. *Proceedings of the World Tunnel Congress-Tunnels Under Pressure*. South African Institute of Mining and Metallurgy, ISBN 1-919783-11/3, 47-53.
- Bilgin, N., (1989). *İnşaat ve maden mühendisleri için uygulamalı kazı mekaniği*, Birsen yayinevi, ISBN 975-51-010, İstanbul, 192.
- Bilgin, N., Dincer, T., Copur,H., (2002). The performance prediction of impact hammers from Schmidt hammer rebound values in Istanbul metro tunnel drivages, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **17**, 237 –247.
- Bilgin, N., Shahriar, K., (1987). Madenlerde mekanize kazı için bir ölçme sisteminin geliştirilmesi ve TTK Amasra kömür bölgesine uygulanışı, *Tübitak Proje No:674*. s. 99.
- Çopur H, Tuncdemir H, Bilgin N, Dincer T., (2001). Specific energy as a criterion for use of rapid excavation systems in Turkish mines. *Trans Inst Min Metall Section A*; 110-149.
- Çopur, H., Ozdemir, L. ve Rostami, J., (1998). Roadheader application in mining and tunnelling. *Mining Engineering*, March, 38-42.
- Çopur, H., Rostami, J., Ozdemir, L. ve Bilgin, N. (1997). Studies Performance prediction of roadheaders based on field data in mining and tunneling projects. *Proc. Int. 4th Mine Mechanization and Automation Symp.*, Brisbane, Australia, 4A1 -7.
- Demirçin, M.A., (2002). Tüf numunelerinin kesilme özellikleri, *Gelişme raporu*, İTÜ Maden Fakültesi.
- Göktaş, M., Ayday, C., (1993). A suggested improvement to the Schmidt rebound hardness ISRM suggested method with particular reference to rock machineability, *International Journal of Rock Mechanics and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **30/3**, 321-322.
- Kel, K., Akçin, N., Tuçdemir, H., Bilgin, N., (2001). Cuttability characteristics of some high strength rocks for roadheaders selection in Zonguldak Coalfield, *MPES Tenth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, November 19-21, New Delhi, India, 789-795.
- McFeat-Smith, I., ve Fowell, R.J., (1977). Correlation of Rock Properties and the Cutting Performance of Tunnelling Machines, *Conference on Rock Engineering*, University of Newcastle-Upon-Tyne, Apr., 581-602.
- Neil, D. ve Ozdemir, L., (1991). Considerations for Development of Hard Rock Roadheaders, *International Symposium on Mine Mechanization and Automation*, **2**, June 10-13, 1-7.
- Neil, D. M., Rostami J., Ozdemir, L., Gertsch, R., (1994). Production Estimating Techniques for Underground Mining Using Roadheaders, *SME/AIME Annual Meeting*, 1994, Albuquerque, New Mexico, 1-11.
- Rostami J., Ozdemir L., Neil, D. M., (1994). Roadheaders Performance Optimization For Mining and Civil Construction, *Proceedings of 13th Annual Technical Conference, Institute of Shaft Drilling Technology (ISDT)*, Las Vegas, NV, 18-21.
- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D. M., (1994). Performance prediction: A key issue in mechanical hard rock mining, *Mining Engineer*, 1265-1267.
- Sahinler, S., (2000). En küçük kareler yöntemi ile doğrusal regresyon modeli oluşturmanın temel prensipleri, *MKÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, **5/2**, 57-73.
- Speight, H E., (1997). Observations on drag tool excavation and the consequent performance of roadheaders in strong rock, *The Australian Institute of Mining and Metallurgy Proceedings*, **1**, 17-32.