

Kollu galeri açma makinelerinin cevher kazısında kullanımının araştırılması

Hakan TUNÇDEMİR*, Nuh BİLGİN

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

Özet

Dünyada maden fiyatları düşme eğilimine girmiştir. Bu yüzden Türkiye yeraltı madenlerinde mevcut üretim yöntemlerinin gözden geçirilerek hızlı ve düşük maliyetli kazı teknolojilerine geçiş hızlandırılmalıdır. Bu amaçla, Türkiye’de, kömür dışı yeraltı madenlerinde, -cevher kazısında- kollu makinelerin (veya benzerlerinin) kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ele alınan her bir cevher ve yankayaç için dünyada yalnızca birkaç üniversitede bulunan “Doğrusal Kazı Seti’nde” kesme deneyleri yapılarak optimum kazı koşulları belirlenmiştir. Daha sonra performans tahmin yöntemlerinden faydalanılarak olası kullanılacak bir mekanik kazıcı için önceden performans tahmini yapılmıştır. Sonuç olarak; kayaç kazarken sarfedilen enerjinin pasa irilik katsayısı veya kayaç mekanik özelliklerinden kestirilebileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Cevher kazısı, hidrolik kırıcı, kayaç mekanik özellikleri, kollu makine, pasa irilik katsayısı, spesifik enerji.*

Investigation of Boom type machines usage for ore extraction

Abstract

Global trends, environmental restrictions, and other market conditions forced, in the last decade, mining companies all over the world to be more profitable and competitive. One of the ways to be more profitable is to use mechanical miners, such as roadheaders, continuous miners, impact hammers and tunnel boring machines, for ore extraction and excavation of development drivages. Since these miners allow for continuous operation, it is expected that mechanization of mines with mechanical miners would increase productivity, decrease production cost and improve competitiveness. The basic focus of this study is to investigate the possibility of using rapid excavation systems and to predict cutting rates in some of the underground mines in Turkey. To fulfil the requirements of these objectives, optimum cutting conditions were determined for every rock samples using “Full-Scale Linear Cutting Machines”, which was established at Technical University of İstanbul, Faculty of Mines, Mine Mechanization Laboratories. The performance prediction for rapid excavation systems were realized using the cutting test results, empirical and theoretical performance prediction models. These studies indicated that the specific energy (energy spent to excavate a unit volume of the rock) used on rock excavations, could be estimated from the mechanical rock properties (such as compressive strength and tensile strengths) and the coarseness index values.

Keywords: *Boom type machines, coarseness index, jack hammers, mechanical rock properties, ore excavation, specific energy.*

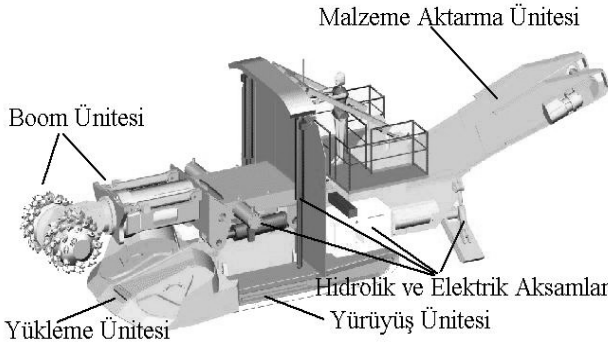
*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hakan Tunçdemir. tdemir@itu.edu.tr Tel: (212) 285 63 39.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Maden Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Kollu galeri açma makinelerinin veya benzer makinelerin cevher kazısında kullanımının araştırılması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 17.05.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 04.07.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 28.02.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Teknolojik gelişmelere paralel olarak, yüksek yatırımlar gerektiren madencilik sektöründe, en uygun verimlilik düzeyini yakalamak ve işletme maliyetlerini düşürmek için hazırlık ve üretim gibi her aşamada, makine ile kazı kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu görüşün ışığı altında, ülkemizdeki yeraltı madenlerinde de uygulanan üretim yöntemlerinin yeniden gözden geçirilerek daha verimli ve maliyeti düşürücü sistemlere geçişin hızlandırılması gerekmektedir.

Bununla beraber dünya metal madenleri piyasasında metal fiyatları gittikçe düşmektedir (Sullivan v. diğ., 2001). Bu yüzden birçok maden kapanma tehlikesi ile karşı karşıya kalmıştır. Maliyetleri düşürmek ve verimliliği artırmak amacı ile yeni mekanize üretim sistemleri araştırılmaya başlanmış, Şekil 1’de üniteleri gösterilen kollu makinelerin hareket kabiliyetlerinin yüksekliği ve birçok cevher üretim yöntemiyle birarada çalışabilme özelliği, üretim aşamasında kullanılması fikrini ortaya çıkarmıştır. Makine ile cevher kazısı yapılan birkaç uygulamada da oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Atlas Copco-Robbins 1996, Breitrick, 1998).



Şekil 1 Bir kollu makine ve üniteleri

Metal cevheri kazısında bu tür makinelerin kullanılmaları ve üretim yöntemlerinin de bu makinelere göre modellenebilmesi için herşeyden önce, kazılması düşünülen cevher formasyonun mekanik ve kazılabilirlik özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bunun için de bir dizi arazi ve laboratuvar çalışmasına gerek vardır:

Arazide yapılan çalışmaların temel amacı cevher

ve yankayaç hakkında bilgi toplamak, yerinde deneyler yapmak (Schmidt Çekici gibi) ve laboratuvarda yapılacak deneyler için formasyonu temsil eden numuneler almaktır.

Laboratuvar deneyleri ise, kaya mekaniği ve kazı mekaniği deneyleri olmak üzere iki gruba ayrılırlar:

Kaya mekaniği deneyleri; tek eksenli basınç dayanımı deneyi, Brezilian (endirekt çekme dayanımı) deneyi, Cerchar aşındırıcılık deneyi, statik ve dinamik elastisite modülü testleri, Schmidt Çekici gibi deneylerdir.

Kazı mekaniği deneyleri ise gerçek boyutlu keskinlerin kullanıldığı tam boyutlu doğrusal kazı seti ile yapılan kesilebilirlik deneyleridir. Bu deneylerde kayacı kesmek için gerekli olan kesme kuvvetleri (FC, FN) ve sarfedilen spesifik enerji (SE) belirlenir. Kazı deneyleri sonrasında ortaya çıkan pasaların bir elek seti ile elenerek parça boyut dağılımı tespit edilir. Buradan pasalılık katsayısı (PİK) hesaplanır.

Tüm bu faaliyetler kollu galeri açma makinaları veya benzer makinaların -cevher kazısında kullanılmalarının araştırıldığı bu çalışmada uygulanmış ve aşağıdaki amaçlar hedeflenmiştir:

- Kollu galeri açma makinaları ve geniş arınlı sürekli kazıcıların dünyada cevher üretiminde kullanılmalarıyla ilgili detaylı kaynak araştırması,
- Araştırma için seçilen Türkiye’deki yeraltı madenlerine genel bir bakış; maden yataklarının, üretim yöntemlerinin ve organizasyonlarının incelenmesi,
- Türkiye’deki kömür dışında kalan yeraltı madenlerinde kollu galeri açma makinalarının veya geniş arınlı kazıcıların cevher kazısında kullanılabilirliğinin araştırılması,
- Seçilen pilot madenlerde, cevherlerin kesilme karakteristiklerinin kayaçlardan ne kadar farklı olduğunun kazı mekaniği açısından saptanması ve incelenmesi, kesme deneylerinden elde edilecek ortalama kesme ve normal kuvvetlerin aralarındaki ilişkisinin ne olduğunun araştırılarak birim m³ kazı için harcanan enerji ile ilintisinin tespit edilmesi,

• Bu madenlerde kullanılan cevher üretim yöntemlerindeki verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek için yapılması gerekenlerin kollu galeri açma makineleri veya geniş arınlı kazıcıların kullanımı açısından irdelenmesi ve gerekirse (verimli kazı yapıldığı tespit edilirse) üretim yöntemi öngörüsünün yapılması.

Materyal ve metod

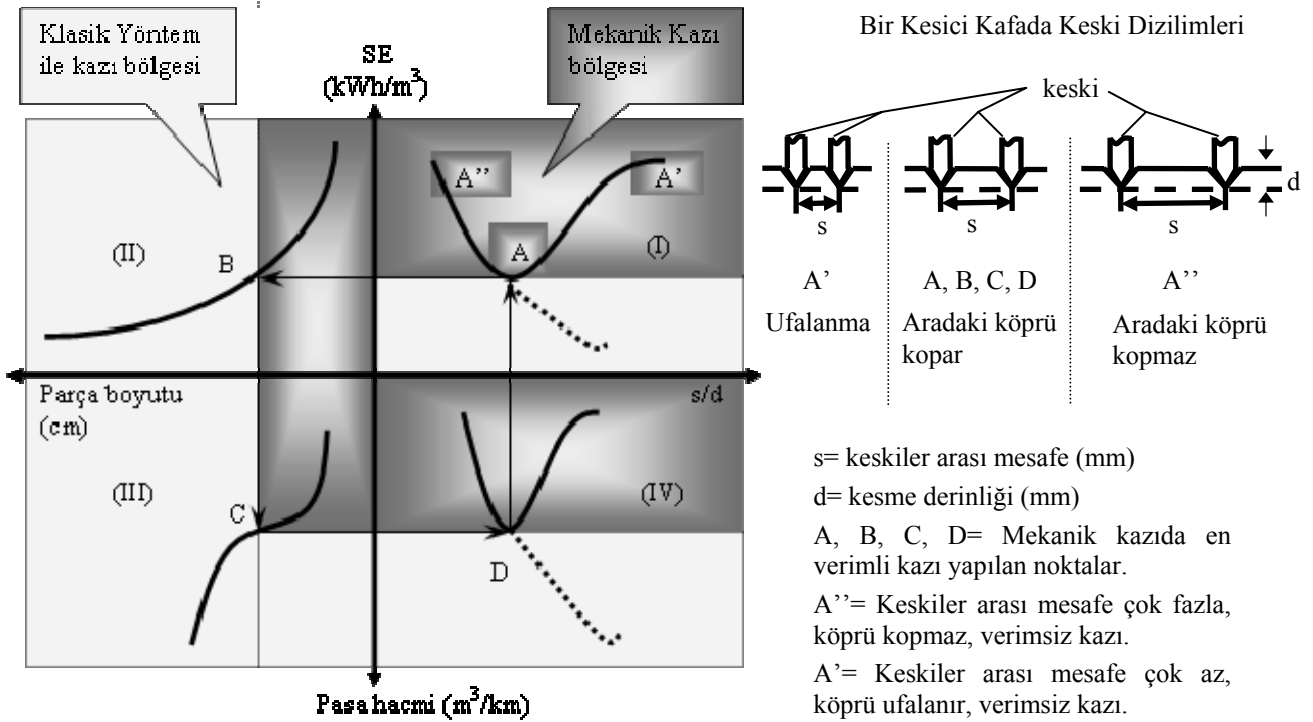
Mekanik kazıcılar ve cevher kazısında uygulamaları

Yeraltında kazı işlemleri genel olarak klasik kazı (delme-patlatma) ve mekanize kazı olmak üzere ikiye ayrılır. Delme-patlatma ile kazıda çok iri parça açığa çıktığından, yöntem diğerlerine nazaran daha verimli olanı diye tanımlanabilir. Fakat ilerleme hızının sınırlı oluşu, titreşimlerin açığa çıkması, aşırı söküm yaparak tahkimat ve emniyet problemleri çıkarması bu yöntemin uygulanışını sınırlamaktadır (Özdemir, 1994). Bununla beraber, tüm işletme maliyetleri göz önüne alındığında, açılan tünel uzunluğu arttıkça mekanik kazıcılar daha verimli kazı yaparlar. Bu yüzden uzun boylu ve sürekli tünel ya da galeri kazısında tercih edilirler (Pakes, 1991).

Şekil 2’de klasik kazı ile mekanize kazıyı karşılaştırmak için, en önemli mekanize kazı işletme parametreleri olan spesifik enerji (SE) (birim hacimdeki kayacı kazabilmek için gerekli olan enerji (kWh/m^3)), keski arası mesafe (s) ile kesme derinliği (d) arasındaki oran (s/d) ve hem mekanize kazı hem de klasik kazı parametresi olan parça boyutu (cm) ve pasa hacmi (m^3/km) arasındaki ilişki irdelenmiştir.

Şekil 2’de (I). bölgede A noktası mekanize kazıda en düşük enerji harcanarak kazı yapılan optimum s/d noktasının yerini göstermektedir. Yani herhangi bir kayaç kazısı için dizayn edilen bir kesici kafada keski arası mesafenin en uygun olduğu aralık ve kesme derinliğinin en uygun olduğu derinlik değerlerinde, en düşük spesifik enerji değeri elde edilmektedir (A noktası).

Bu yüzden A noktasının altında kalan alan klasik kazı bölgesi olarak tanımlanabilir. Şekile göre klasik kazı daha avantajlı görünmektedir. Ancak tüm maliyetler gözönüne alınırsa; kazı uzunluğu arttıkça, mekanik kazıyla daha ekonomik kazı yapıldığı unutulmamalıdır.



Şekil 2. Klasik-mekanize kazı karşılaştırması

Şekil 2’de (II). bölge mekanize yada klasik kazı sırasında elde edilen pasaların parça boyutu arttıkça, bu pasayı parçalamak için harcanan enerjinin de azaldığını gösteren bir bölgedir. Yani klasik yöntem ile kazıda daha büyük parçalar elde edilirken mekanize kazı yönteminde elde edilecek parçaların büyüklüğü ancak optimum s/d noktasında oluşan spesifik enerjinin meydana gelmesinde rol oynayan pasa parça büyüklüğü kadar olacaktır. Bu durumda oluşan parça büyüklüğü B noktasının apsisinden daha büyük olamaz. Bu yüzden B noktasının solunda kalan bölge klasik kazı bölgesi, sağında kalan bölge de mekanize kazı bölgesi olacaktır.

Şekil 2’de (III). bölge parça boyutunun arttıkça pasa hacminin de arttığını göstermektedir. Ancak mekanize kazıda pasa hacmini sınırlayan faktörler vardır: teorik olarak pasa hacmi keski-ler arası mesafe (s) ile kesme derinliği (d)’nin oluşturduğu köprü alanı ve kazı uzunluğunun oluşturduğu pasa hacim geometrisinden daha büyük olamaz. Bu yüzden C noktasında bir sabitleşme söz konusudur. Ancak bu noktadan sonra klasik yöntem ile kazı bölgesine geçildiğinden parça boyutu da büyüyecek, pasa hacmi de artacaktır.

Şekil 2’de (IV). bölge pasa hacmi ile optimum s/d arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Mekanize kazıda en düşük spesifik enerjinin harcandığı optimum s/d noktasında, en yüksek pasa hacmi elde edilir (D noktası). Elde edilen bu pasanın parça boyutları da mekanize kazı için en büyük parça boyutları olacaktır. Klasik kazıda “s” patlayıcı madde delikleri arası mesafeyi “d” de deliklerin derinliği olarak düşünülürse; patlatma sonrası oluşacak pasa hacmi kesikli çizgi boyunca artacak, yine parça boyutu da bu kesikli çizgi boyunca büyüyecektir.

Mekanik kazıcılar için performans tahmini

Mekanik kazı, güvenli ve ekonomik olmasının yanında, selektif madencilik yapılabilmesi, esnek kullanım şartlarına sahip ve hareket kabiliyetinin yüksek olması, sert ve aşındırıcı kayaçları kazabilme yeteneğinden dolayı tercih edilmektedir.

Bir jeolojik formasyonun kayaç kütlesi özellikleri

(çatlak sayısı ve sıklığı, yataklanma düzlemleri, doğrultuları, hidrojeolojik şartlar, yatak geometrisi vb.) ve sağlam kaya özellikleri (kesilebilirlik, aşındırıcılık, dayanım, doku vb.) mekanik kazıcıların seçiminde, performans tahminlerinde ve kesici kafa dizaynlarında başlıca parametreleri oluşturur.

Herhangi bir formasyonu kazmak için kullanılacak bir mekanik kazıcının performans tahmini kazının ekonomikliğinin belirlenmesinde ana faktörlerden biridir. Kazı performansı tahmininde değişik metotlar vardır. Gerçekçi sonuçlar için kestirim bir kaç metot uygulanarak yapılmalıdır. Bu metotlar; tam boyutlu kesme deneyleri, küçük boyutlu kesme deneyleri (karot kesme), ampirik yaklaşımlar, yarı teorik yaklaşımlar ve arazide gerçek bir makine kullanımı olarak bölümlere ayrılabilir.

Doğrusal kazı seti ile bir kayaç numunesi keserken pratikte kullanılan bir keskiye etkiyen tam boyutlu keski kuvvetleri ölçülür. Bu kuvvetler, mekanize kazıcı ve keski seçiminde, kesme geometrisinin belirlenmesinde, performans ve maliyet tayininde kullanılır. İlgili kayacı parçalamak için gerekli olan kesme, normal kuvvetler ve spesifik enerji değerleri farklı kesme derinliği ve keski arası mesafelerde belirlenir ve daha sonra (1) bağıntısında verilen eşitlikle mekanik bir kazıcı için net ilerleme hızı (ICR) m³/h olarak hesaplanabilir (Rostami v. diğ., 1994). Bu eşitlikte P kesici kafanın kesme gücü (kW), SE_{opt} (kWh/m³) kesme deneyleri sırasında en verimli kazı yapılan durumda elde edilen spesifik enerji değeri, k ise enerji transfer katsayısıdır.

$$ICR = k \cdot \frac{P}{SE_{opt}} \quad (1)$$

Küçük boyutlu kesme deneyleri arazide ve laboratuvarında bir çok kayaç üzerinde yapılan deneyler ve gözlemler sonucunda oluşturulmuş, en yaygın olarak kullanılan yöntemdir (Mc Feat-Smith ve Fowell 1977, 1979).

Ampirik performans tahmin modelleri, temel olarak geçmiş deneyimlere ve daha önce bu

konuda yapılan çalışmalardan elde edilen verilerin istatistikî analizlerinin yorumlanmasına dayanır. Çok yaygın bir şekilde kullanılan bu yöntem, birçok tünelde veri toplama çalışmalarına dayandırılan bir yaklaşım ile tamburlu, spiral tipli kollu makine ve hidrolik kırıcıların anlık kazı hızı tahmin edilebilmektedir (Bilgin v. diğ., 1988, 1990, 1996, 1997, Hartman v. diğ., 1992, Eskikaya v. diğ., 1998). Bu yöntemde, kazıcı makinelerin performansının basınç dayanımına ve RQD'ye bağlı olarak değiştiği anlaşılmış ve (2) eşitliği ile gösterilen kayaç kazılabilirlik indeksi (RMCI) ile ifade edilmiştir.

$$RMCI = UCS \times (RQD/100)^{2/3} \quad (2)$$

Bu indeks kullanılarak roadheader için net kazı hızı (ICR) (m^3/h), eşitlik (3)'teki gibi hesaplanır. Burada P, beygir gücü olarak makine gücüdür.

$$ICR = 0.28 \times P \times (0.974)^{RMCI} \quad (3)$$

İstanbul Metrosu'nda yapılan kazılarda 33 kW'lık bir güce sahip hidrolik kırıcı kullanıldığı sırada toplanan verilerden de bir hidrolik kırıcı performans tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Buna göre net kazı hızı (m^3/h); eşitlik (4)'teki gibi hesaplanır:

$$IBR = 4.26 P (RMCI)^{-0.567} \quad (4)$$

Yarı teorik performans tahmin yöntemlerinde bilgisayarla tasarlanarak oluşturulmuş bir model kullanılır. Bir çok makine üreticisi, araştırma enstitüsü ve danışman firmalar bu amaç için geliştirilen kendi bilgisayar modellerini geliştirmişlerdir (Çopur, 1999; Hurt v. diğ., 1982; Rostami ve Özdemir, 1994;).

Gerçek bir makine ile performans tahmininde, kullanılmış ya da yeni bir makine kiralanır ve kullanılması düşünülen bir madende test edilir (Örneğin Carlin East Altın madeni Breitrack, 1998). Bu, çok pahalı ve zaman alıcı bir yöntem olmakla birlikte, en doğru performans tahmini yapılabilen bir yöntemdir.

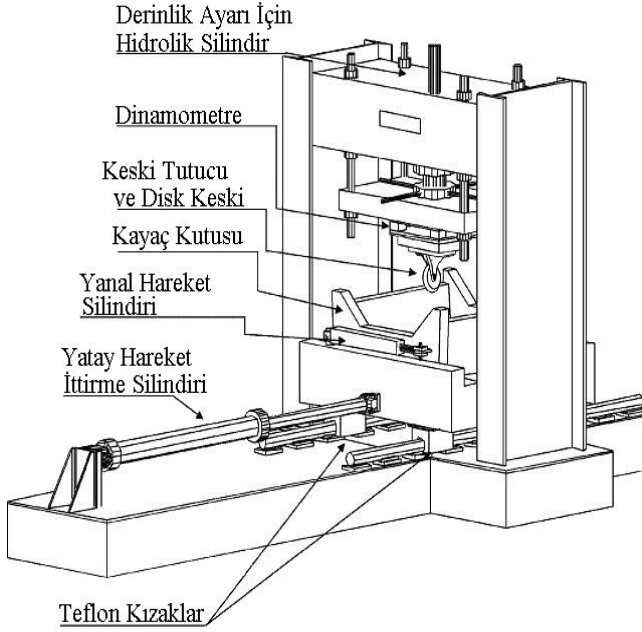
Kaya mekaniği ve kazı mekaniği deneyleri

Kayaçların kazılabilirlik özelliklerini tespit etmek için bu güne kadar bir çok araştırma yapılmış, bazı temel kurallar belirlenerek, kazı mekaniği prensipleri ortaya konulmuştur. Ancak krom, trona, bakır, selestit gibi cevherlerin kesilebilirlik özellikleri bu güne kadar tam olarak açıklığa kavuşmamıştır. Bu tür cevherlerde kristal boyutlarının, kristaller arası yapı gibi özelliklerin, kesme mekaniğini etkileyeceği çok açıktır. Genelde metal cevherleri aşındırıcı oldukları için mekanik kazıcılar doğrudan metal cevheri üretiminde kullanılamamaktadır. Bunun için öncelikle cevher numuneleri kazılabilirlik deneylerine tabi tutulmakta ve kazı makinelerinin tariflenen cevherlerde kullanılabilmesi için imalatçı firmalara gerekli bilgiler sağlanmaktadır.

Bu amaçla Kayseri Pınarbaşı-Pulpınar kromit madeninden yüksek (roş 1) ve orta (roş 2) dereceli tenör içeriğine sahip iki ayrı cevher numunesi (% 46-50, % 42-46 Cr_2O_3) ve harsburjit yankayaç numunesi, Eskişehir Kavak kromit madeninden düşük tenörlü (%20-25 Cr_2O_3) bir cevher numunesi ve serpantin yankayaç numunesi, Beypazarı tronadan cevher ve Çayeli bakırdan sarı ve siyah cevher numunesi, Sivas Barit Maden'den selestit, jips ve anhidrit numuneleri mekaniksel özellik tespiti ve kazılabilirlik deneyleri yapmak üzere İ.T.Ü. Maden Fakültesi laboratuvarlarına getirilmiştir.

Numuneler, Şekil 3'te elemanları gösterilen tam boyutlu doğrusal kazı setinde bulunan kayaç kutusuna beton ile sabitlenerek yerleştirilmiş ve bir Sandvik S35-80H kalem uçlu keski kullanılarak kesme deneylerine tabi tutulmuştur.

Kesme deneyleri, yüzey düzleştirildikten sonra derinlik $d=5mm$ ve $10mm$ olacak şekilde Şekil 3'te gösterilen derinlik ayarı hidrolik silindiri ile, keski arası mesafe ise bu derinliğin 1, 2, 3, 5 katı ve yardımsız olacak şekilde yanal hareket silindirleriyle ayarlanmış, dinamometre üzerine yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerlerle belirlenen kesme kuvvetleri ise bir data iletim kutusu ile bilgisayar verisi olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3. Doğrusal kazı seti ve üniteleri

Kesme deneylerinden kesme derinliği (d) ve keski arası mesafe (s) arasındaki optimum oran, ortalama kesme (FC , kg, kN) ve normal (FN , kg, kN) kuvvet miktarı, maksimum kesme ($F'C$, kg, kN) ve normal ($F'N$, kg, kN) kuvvet miktarı, birim mesafede elde edilen pasa hacmi (Q , m^3/km) belirlenir. Bu işletme parametreleri

bilindiğinde formasyonu kazmak için seçilecek bir makinenin birim hacimdeki kayacı kazabilmek için sarfedeceği optimum enerji miktarı (SE_{opt}) (5) eşitliği ile belirlenebilir (Roxborough, 1973, Bilgin, 1989, Rostami v. diğ., 1993).

$$SE_{opt} = \frac{FC}{Q} \quad (MJ/m^3, kWh/m^3) \quad (5)$$

Bu amaçla, ele alınan madenler için yapılan kaya mekaniği deneylerinde elde edilen sonuçlar Tablo 1'de görüldüğü gibidir.

Basınç ve çekme dayanımı deneyleri ELE 3000 hidrolik test makinesinde sırasıyla 55-110 mm (NX) ve 55-55 mm boyutlarındaki karot numuneler kırılarak yapılmış ve bu sırada oluşan kırılma yükleri ölçülmüştür. Statik elatisite modülü aynı test aletine yerleştirilmiş bir NX numunenin üzerine konulan yük hücresiyle beraber yüklenmesi ve kırılma anına kadar oluşan düşey (gerilme) ve yatay (deformasyon) yer değiştirmenin bir milimetrik kağıda x-y kaydedici ile çizilmesi sonucu oluşan gerilme-deformasyon grafiğinin yorumlanması ile bulunmuştur.

Dinamik elatisite modülü deneyi, enine (P) ve boyuna (S) dalgaların ölçülmesi için kullanılan

Tablo 1. Ele alınan madenler için yapılan kaya mekaniği deney sonuçları

Kayaç	γ (g/cm^3)	UCS (MPa)	BTS (MPa)	E_{sta} (GPa)	E_{dyn} (GPa)	SHRV	CAI
Yüksek Tenörlü Kromit (% 46-50 Cr_2O_3)	4.03	32.2	3.7	3.5	31.2	28-37	2.12
Normal Tenörlü Kromit (% 42-46 Cr_2O_3)	3.39	46.9	4.5	-	76.4	43	1.60
Düşük Tenörlü Kromit (% 20-25 Cr_2O_3)	2.88	46.5	3.7	2.9	35.2	42	2.40
Bakır Cev. (Sarı)	4.13	32.8	3.4	-	42.0	-	2.80
Bakır Cev. (Siyah)	4.07	41.4	5.7	-	49.6	-	3.00
Harsburjit	2.65	57.7	5.5	2.1	16.1	35-59	0.80
Serpantin	2.49	38.1	5.7	2.3	13.9	39-58	1.00
Trona	2.13	29.7	2.2	3.4	3.7	39	-
Anhidrit	2.90	82.0	5.5	-	-	-	-
Selestit	3.97	29.0	4.0	-	-	-	-
Jips	2.32	33.0	3.0	-	-	-	-

Pundit cihazıyla yapılmıştır. Bir NX karot numunesi içinden bir verici ve alıcı ile enine ve boyuna dalgalar geçirilir ve bunların geçiş hızı ölçülür. Bu hızlar kayacın içerisindeki boşluklara homojenliğine ve süreksizlik içeriğine bağlı olarak değişir. Schmidt Çekici deneyleri N tipi bir çekiçle arazide cevher ve yankayaç formasyonları üzerinde birkaç farklı noktanın her birine 20 vuruş yapılarak gerçekleştirilmiş ve bu vuruşların son 10-15 değerlerinin ortalaması alınarak Schmidt Çekici sertlik değeri belirlenmiştir. Cerchar aşındırıcılık indeks değerleri ise 160 kg/mm^2 çekme dayanımı olan 90° tepe açılı konik bir uç 7 kg bastırma kuvveti ile düzgün yüzeye sahip olması gerekmeyen bir numune üzerinde 1 cm çekilmiş ve ucun tepesinde oluşan aşınma yüzeyi boyutlarının ölçülmesi ile bulunmuştur.

Kesme deneyleri sırasında oluşan pasaların, bir elek seti (0.125, 0.5, 2, 8, 25 mm) kullanılarak analiz edilmesiyle optimum koşullarda oluşan pas irilik katsayısı (PIK) değerleri de belirlenmiştir.

5 adet elek kullanılarak yapılan elek analizleri sonucu 6 ürün elde edilmiş ve bu ürünlerin kümülatif yüzde toplamları alınarak pasa irilik katsayısı değerleri bulunmuştur. Eğer bir kazı işlemi sonucunda kazılan malzemenin tamamı +25 mm üzerinde olsaydı, her bir elek grubu için kümülatif ağırlık yüzdesi 100 olacağından bu set için PİK değeri 600'den fazla olamazdı. Aynı mantıkla hareket edilecek olursa; eğer kazılan malzemenin tamamı -0,125 mm altında kalmış olsaydı, bu kez PİK değeri 100'den düşük olamazdı. Bu durumda 5 elek kullanılan ve 6 ürün elde edilen bir elek setinde PİK sayısı en az 100 en fazla da 600 olmak zorundadır. Kazılan malzemenin parça boyutu ne kadar büyükse malzeme o kadar ağır olacağından PİK'te 600 sayısına doğru yaklaşacaktır. Kazılan malzemenin parça boyutu ne kadar küçükse malzeme o kadar hafif olacağından PİK'te bu kez 100'e doğru yaklaşacaktır.

Sonuçlar ve tartışma

Kaya mekaniği deney sonuçları bir arada irdelendiğinde tenör ile basınç dayanımı, çekme dayanımı gibi kaya mekaniği parametreleri, SE

ve kesme kuvvetleri gibi kazı mekaniği parametreleri arasında herhangi bir doğrusal ilişki bulunamamıştır.

Geçmişte yapılan bazı çalışmalar, kazılan kayacın kırılabilirliğinin basınç dayanımı ile çekme dayanımının çarpımı ve kesme kuvvetleri ile ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (Çopur, 1999). Altındağ, 2000 senesinde, kayacın tek eksenli basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasında oluşan doğrusal ilişki grafiğinin altında kalan alanın kayaç kırılabilirliğinin bir ifadesi olarak kullanılabilirliğini ifade etmiştir. Bu alan bir dik üçgen alanı olduğundan $(UCS \times BTS/2)$ olarak denkleştirilmiştir.

Deneyler bu açıdan irdelendiğinde, $d=10 \text{ mm}$ 'de elde edilen verilerde, SE_{opt} değerlerinin $(UCS \times BTS)$ ile yüksek korelasyonlu ve doğru orantılı olarak değiştiği ($R^2=\% 86$); (Şekil 4) anlaşılmıştır. Anhidrit değişik yapısal özelliklere sahiptir. Önceden de tespit edildiği gibi, beklenenden çok daha farklı kesme deney sonuçları elde edilmiştir (Bilgin, 1982). Bu nedenle regresyon analizine dahil edilmemiştir.

Buradan, orta sert ve sert cevher ve yankayaçlarında, basınç ve çekme dayanımının çarpımı, $d=10 \text{ mm}$ kesme derinliğinde elde edilen optimum spesifik enerji değerleri ile lineer ve doğru orantılı olarak değişir yargısına varılabilir. Bu tip cevher ve yankayaçların kazısında sarfedilecek enerji SE, bu kayaçların $UCS \times BTS$ çarpımı ile kestirilebilir. Bu da (6) eşitliği ile ifade edilmiştir (Çopur v. diğ., 2001).

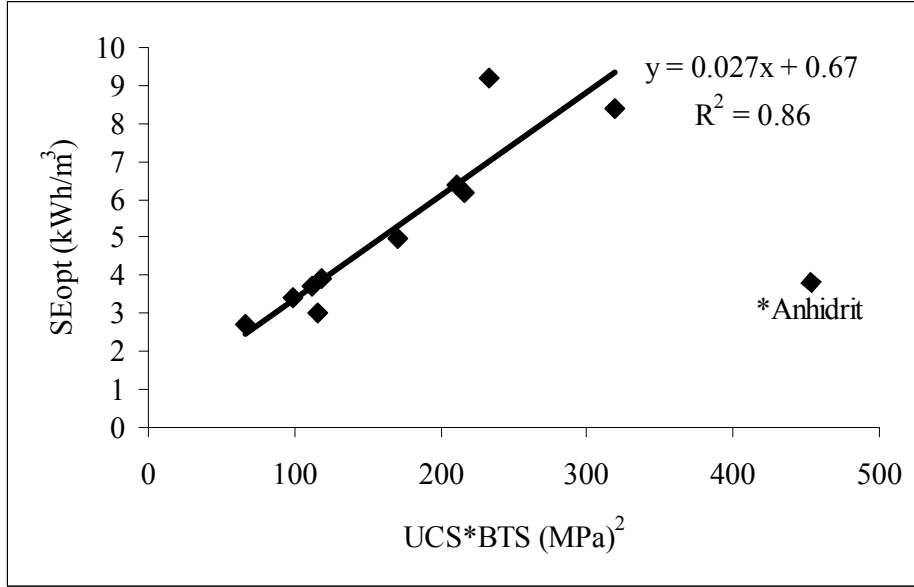
$$SE_{opt} = 0,027 (UCS \times BTS) + 0,67 \quad (6)$$

Bunun yanısıra, üç ayrı içerikli kromit numunesi birarada irdelendiğinde, kazı enerjisi (SE) ile pasa irilik katsayısı (PIK) değerleri arasında oldukça yüksek korelasyonlu lineer ve ters orantılı ilişkiler tespit edilmiştir (Şekil 5).

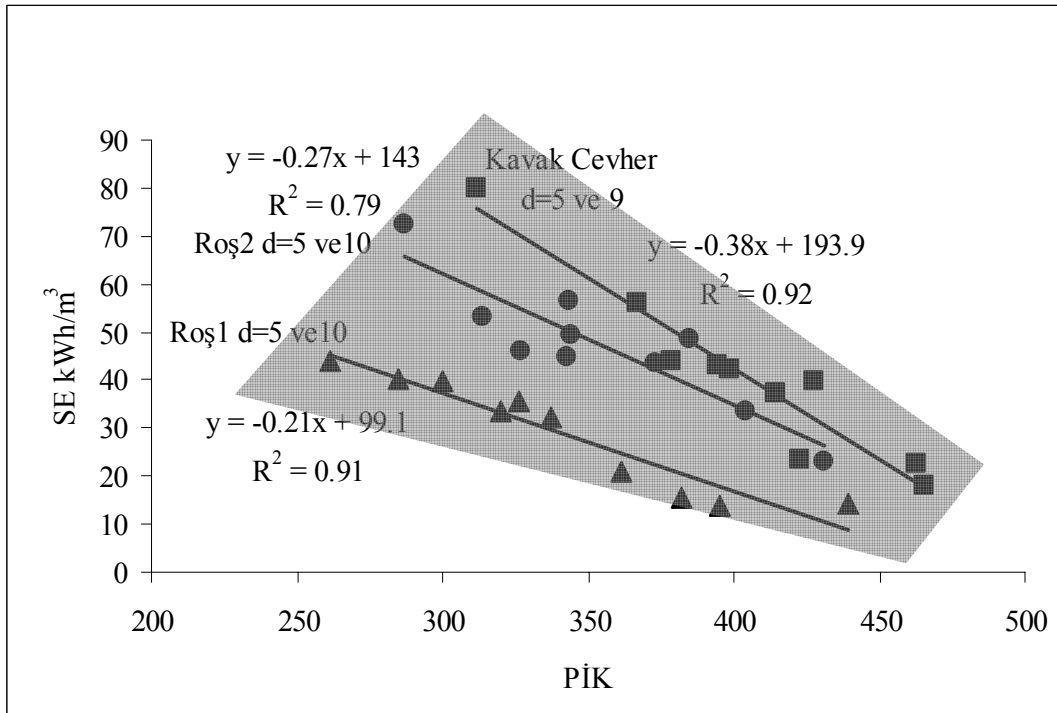
Bu ilişkiler eşitlik (7), (8) ve (9)'da gösterildiği gibidir:

$$d=5-10 \text{ mm}'de \text{ roş 1 için } (R^2=0,91);$$

$$SE = -0,057 \times (PIK) + 27,54 \quad (7)$$



Şekil 4. Kesme deneyi yapılan tüm numuneler için UCS×BTS ile SE arasındaki ilişki
*Anhidrit değişik yapısal özelliklere sahip olduğu için kazı mekaniği kurallarına uygun sonuç vermemektedir, bu nedenle regresyon analizine dahil edilmemiştir (Bilgin, 1982).



Şekil 5. Üç ayrı içerikli kromit için d=5-10 mm'de yapılan deneylerdeki PİK ve SE değerleri arasındaki ilişki

d=5-10 mm de Roş 2 için ($R^2=0.79$);

d=5-9 mm de Kavak cevher için ($R^2=0.92$);

$$SE = -0.075 \times (PİK) + 39.73$$

(8)

$$SE = -0.010 \times (PİK) + 53.86$$

(9)

Bu ilişkiler gözönüne alınarak pasa irilik katsayısı (PİK) ile özgül enerji (SE), kesmeler arası mesafe / kesme derinliği oranı (s/d) ve pasa hacmi (Q) arasında Şekil 6'da görülen genelleştirilmiş dörtlü grafik oluşacaktır.

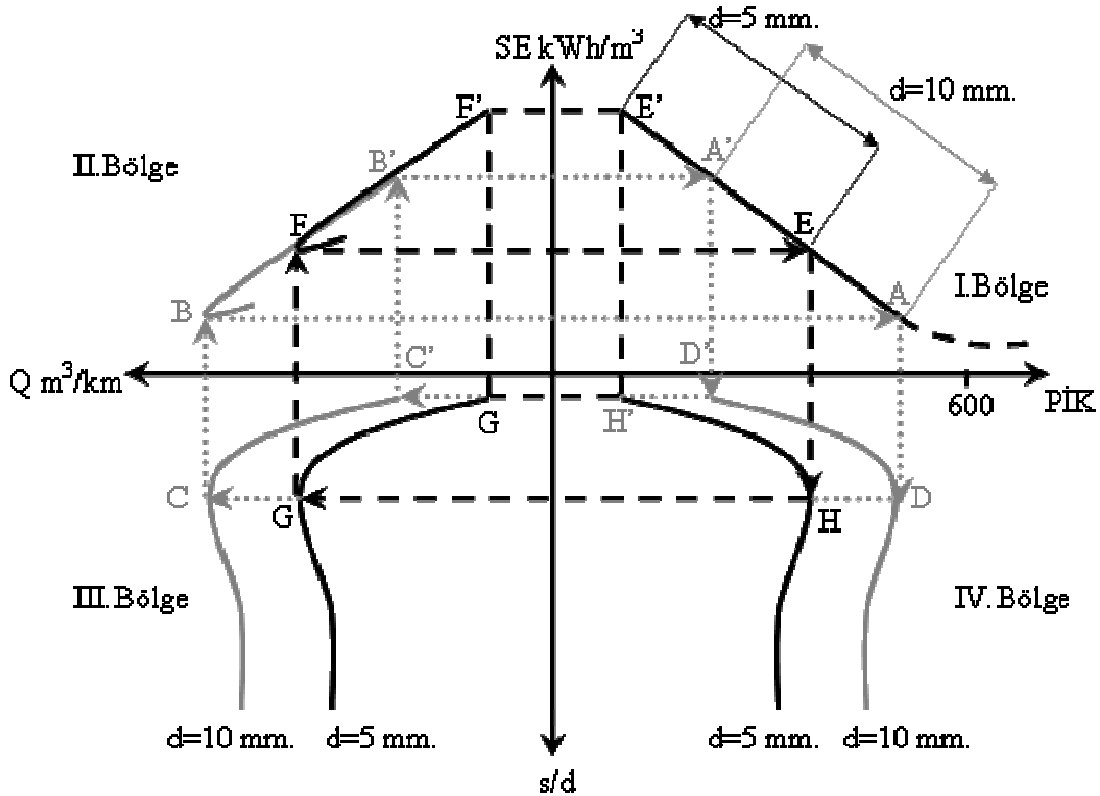
Bu grafikte; I. Bölgede A noktası; d=10 mm'de en yüksek pasa irilik katsayısı, en uygun kesmeler arası mesafe ve en düşük spesifik enerjiye sahip olunan optimum kazının yapıldığı noktadır. A' noktası ise d=10 mm'de en küçük pasa irilik katsayısı, en küçük kesmeler arası mesafe ve en yüksek spesifik enerjiye sahip olunan noktadır. E noktası; d=5 mm'de en yüksek pasa irilik katsayısı, uygun kesmeler arası mesafe ve en düşük spesifik enerjiye sahip olunan optimum kazının yapıldığı noktadır. E' noktası ise d=5 mm'de en küçük pasa irilik katsayısı, en küçük kesmeler arası mesafe ve en yüksek spesifik enerjiye sahip olunan noktadır.

III. Bölgede C noktası; d=10 mm'de en yüksek pasa hacminin optimum s/d oranında oluştuğunu gösteren noktadır. C' noktası ise d=10 mm'de en küçük pasa hacminin oluştuğu s/d oranını

gösteren noktadır. G noktası; d=5 mm'de en yüksek pasa hacminin optimum s/d oranında oluştuğunu gösteren noktadır. G' noktası ise d=5 mm'de en küçük pasa hacminin oluştuğu s/d oranını gösteren noktadır.

IV. Bölgede D noktası; d=10 mm'de en yüksek pasa irilik katsayısının optimum s/d oranında oluştuğunu gösteren noktadır. D' noktası ise d=10 mm'de en küçük pasa irilik katsayısının oluştuğu s/d oranını gösteren noktadır. H noktası; d=5 mm'de en yüksek pasa irilik katsayısının optimum s/d oranında oluştuğunu gösteren noktadır. H' noktası ise d=5 mm'de en küçük pasa irilik katsayısını oluştuğu s/d oranını gösteren noktadır.

Pasa irilik katsayısı ile spesifik enerji arasında şekilden de görüldüğü gibi ters orantılı bir ilişki vardır. Daha yüksek kesme derinliklerinde (d=10 mm) yapılan kesme deneylerinde elde edilen SE değerleri daha düşük çıkarken; pasa irilik katsayısı değerleri doğal olarak daha yüksek çıkmıştır (I. Bölge A-A' değerleri arası). Kesme derinliği ve pasa hacmi arttıkça, pasa



Şekil 6. SE, PİK, Q ve s/d arasındaki ilişkiyi gösteren genelleştirilmiş 4'lü grafik

irilik katsayısı da artar. Keskiler arası mesafe arttıkça pasa irilik katsayısı artar ve optimum s/d değerinde pasa irilik katsayısı en büyük değerini, spesifik enerji de en küçük değerini alır.

Tüm bu yüksek korelasyonlu ilişkiler gözönüne alındığında orta sert ve sert kayaların kazısı sonucu elde edilen pasalar analiz edilerek, bu kayaları kazmak için sarfedilecek enerji miktarının kestirilebileceği yargısına varılabilir.

Ele alınan madenlerin mekanik kazı açısından değerlendirilmesi

Bu çalışmada ele alınan kayaç numuneleri üzerinde laboratuvarında yapılan tam boyutlu kesme deneyleri ile her kayaç için en verimli kesme işleminin gerçekleştirildiği optimum kazı şartları, maksimum kesme kuvvetleri ile ortalama kesme kuvvetleri arasındaki oranlar belirlenmiş ve Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2’de verilen en iyi kesme durumundaki değerler kullanılarak daha önce bahsi geçen (1), (2), (3), (4) eşitlikleri yardımıyla net ilerleme hızı (m³/h) ve üretim miktarları (t/h) hesaplanmış ve performans tahmini yapılmıştır. Ele alınan her bir cevher ve yan kayaç için yapılan kestirimler Tablo 3’te özetlenmiştir.

Yapılan kaya mekaniği deneylerinden elde edilen verilerden de görüleceği gibi (Tablo 1) Pınarbaşı-Pulpınar ve Kavak kromit cevher ve yankayaçları, orta sert ve sert kayaç sınıfına girmektedir. Bu nedenle bu kayaçların kazısında 100 kW’lık kesici kafa kesme gücüne sahip kollu makineler ya da 33 kW’lık hidrolik kırıcılar kullanılabilir (Bilgin, 1994).

Yukarıda bahsedilen kazı gücüne sahip makineler kullanılarak yüksek tenörlü kromit için performans tahmini yapılacak olursa aşağıdaki gibi bir yol izlenecektir:

Tablo 3’e göre yüksek tenörlü kromit cevherinde d=10 mm’de yapılan kesme deneyleri sonucunda $SE_{opt} = 3,9 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Kromit cevher kayacını kesmek için 100 kW’lık bir kollu makine kullanıldığında elde edilecek net ilerleme hızı (ICR) (1) eşitliğinden:

$$ICR = 0.8 \frac{100kW}{3.9kWh/m^3} = 20.7 \text{ m}^3/\text{h} \text{ bulunur.}$$

Bulunan net ilerleme hızı, yüksek tenörlü kromitin yoğunluğu (4.03 t/m³) ile çarpılırsa üretilen tüvenan cevher miktarı 83 t/h olacaktır.

Tablo 2. Ele alınan kayaçlar için yapılan kesme deneylerinden elde edilen optimum sonuçlar

Kayaç	(s/d) _{opt}	d _{opt} (mm)	FC (kg)	$\frac{F'C}{FC}$	FN (kg)	$\frac{F'N}{FN}$	PIK	SE _{opt} (kWh/m ³)
Yüksek Tenörlü Kromit	3	10	395	3.60	272	3.26	395	3.9
Normal Tenörlü Kromit	2	10	516	2.78	379	2.51	431	6.4
Düşük Tenörlü Kromit	3	9	455	3.08	363	2.83	465	5.0
Bakır Cev. (Sarı)	4	10	403	3.13	257	3.12	-	3.7
Bakır Cev. (Siyah)	4	10	810	3.04	773	3.02	-	9.2
Harsburjit	5	9	911	2.87	944	2.41	467	8.4
Serpantin	3	9	444	3.17	484	2.65	434	6.2
Trona	3	9	222	4.09	294	2.93	487	2.7
Anhidrit	5	8	451	2.44	452	2.04	-	3.8
Selestit	3	12	390	3.06	301	2.76	-	3.0
Jips	3	8	185	2.28	117	2.28	-	3.4

Tablo 3 Ele alınan kayaçlar için yapılan performans tahmini sonuçları

Kayaç	SE _{opt} (kWh/m ³)	100 kW lık kesme gücü için ICR		33 kW lık hidrolik kırıcı için IBR		Keski tüketim oranı	
		(m ³ /h)	(ton/h)	(m ³ /h)	(ton/h)	(keski/ m ³)	(keski /ton)
Yüksek Tenörlü Kromit	3.9	20.7	83	19.7	79	0.53	0.132
Normal Tenörlü Kromit	6.4	12.6	43	15.8	54	0.40	0.118
Düşük Tenörlü Kromit	5.0	16.2	47	16.0	46	0.60	0.208
Bakır Cev. (Sarı)	3.7	21.8	90	19.4	80	0.70	0.169
Bakır Cev. (Siyah)	9.2	8.7	35	17.1	70	0.75	0.184
Harsburjıt	8.4	9.5	25	14.1	37	0.20	0.075
Serpantin	6.2	12.9	32	17.9	45	0.25	0.100
Trona	2.7	29.6	63	20.4	44	-	-
Anhidrit	3.8	23.5	68	11.6	34	-	-
Selestit	3.0	26.7	106	19.4	45	-	-
Jips	3.4	21.1	49	20.8	83	-	-

Eğer yüksek tenörlü kromit cevher kayacını kazmak için 33 kW'lık bir hidrolik kırıcı kullanılırsa, bu kez elde edilecek net ilerleme hızı (IBR) eşitlik (2) ve (4)'ten bulunur;

Buna göre RQD % 100 ve yüksek tenörlü kromitin basınç dayanımı UCS= 32.2MPa alındığında, RMCI eşitlik (2)'den ;

$$RMCI = 32.2MPa \times (100/100)^{2/3} = 32.2$$

bulunur.

Bu değer, eşitlik (4)'te yerine koyulursa;

$$IBR = 4.26 \times 33kW \times (32.2)^{-0.567} = 19.7 \text{ m}^3/\text{h}$$

olarak bulunur.

Bulunan net ilerleme hızı (IBR), yoğunluk (4.03 t/m³) ile çarpılırsa üretilen tüvenan cevher miktarı 79 t/h olarak bulunur.

Nizamoğlu (1978) ve Fowell (1993) yerinde yaptıkları ölçmelerle keski sarfiyatının formasyonların

Cerchar aşınma indeksleriyle (CAI) doğrudan ilişki içerisinde olduğunu göstermiştir ve bunu bir grafikte ifade etmişlerdir. Bu grafikten faydalanılarak yapılan hesaplarla ele alınan her kayaç için keski tüketim oranları (keski /m³) Tablo 3'teki gibi bulunmuştur.

Sonuçlar

3 ayrı krom, iki ayrı bakır cevheri, trona, harsburgit, serpantin, selestit, jips ve anhidritin basınç dayanımları 29-82 MPa arasında değişmekte ve bu kayaçların Bieniawski'nin (1989) yaptığı bir sınıflamaya göre orta sert ya da sert kayaç grubuna girdikleri anlaşılmaktadır.

Cevherin mekanik kazı yöntemleri ile verimli olarak kazılıp kazılamayacağını anlaşılmaması için seçilen cevher ve yankayaçlarının laboratuvarında kesilebilirlik deneylerine tabi tutulması, optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi, önceden performans tahmin yöntemlerinin kullanılması veya gerçek bir makine ile pilot kazı yapılması gereklidir.

Bu çalışma için ele alınan cevher ve yan-kayaçlar için yapılan kesme deneyleri ve performans tahminlerine göre seçilen 100 kW kesici kafa gücüne sahip bir kollu makine veya 33 kW'lık bir hidrolik kırıcı kullanıldığında; örneğin yüksek içerikli kromit madeninde mevcut üretimin (120.000 ton/yıl) yaklaşık 3 katı kadar daha fazla üretim (345.612 ton/yıl) yapılabileceği anlaşılmıştır.

Bir kromit madeninde kazı yöntemini sınırlayan en önemli faktörlerden biri parça boyutudur. +25 mm büyüklüğünde elde edilen parça kromit daha yüksek fiyatlarla satılabilmektedir. Bu durumda önemli olan hem üretim hızını artırmak hem de mümkün olduğu kadar çok, yüksek içerikli parça cevher elde etmektir. Ampirik performans tahmin yöntemleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda "hidrolik kırıcı" kullanılması ile daha iri boyutlarda ve yüksek üretim kapasitesi ile üretim gerçekleştirimin mümkün olabileceği anlaşılmıştır.

Yapılan bu çalışmaların tümü, pahalı, uzun zaman alan ve teknolojik olarak gelişmiş bir laboratuvar seti gerektiren tam boyutlu kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji değerinin, kayacın basınç ve çekme dayanımından veya pasa irilik katsayısından, belirli bir doğrulukla, tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur.

Bu çalışma çerçevesinde kazı mekaniğine iki konuda katkı sağlanmıştır. Bunlardan birincisi, kazı sırasında çıkan malzemenin parça boyutu ile harcanan enerji arasındaki ilişkinin, ikincisi ise bu enerjinin kayaç özellikleri ile nasıl değiştiğinin açıklanmasıdır.

Semboller

γ	: yoğunluk
UCS	: basınç dayanımı
BTS	: çekme dayanımı
E_{st}	: statik elastik modülü
E_{dyn}	: dinamik elastik modülü
SHR	: Schmidt Çekici sertlik değeri (N-tipi)
CAI	: Cerchar aşındırıcılık indeksi
S	: keskinler arası mesafe
D	: kesme derinliği
d_{opt}	: en iyi kesme koşullarındaki kesme derinliği

FC	: ortalama kesme kuvveti
F'C	: en büyük kesme kuvvetleri
FN	: ortalama normal kuvvet
F'N	: en büyük normal kuvvet
PIK	: pasa irilik katsayısı
SE_{opt}	: en iyi kesme koşullarındaki spesifik enerji

Kaynaklar

- Altındağ R., (2000). Darbeli Delmede Kırılma Analizi. *Yerbilimleri Geosound*, 37, 161-169, Aralık.
- Atlas-Copco Robbins, (1996). TBM Excavates Drift for Early Ore Production. *Project Report Summary Brochure*.
- Bieniawski Z. T., (1989). Engineering Rock Mass Classifications. *Wiley*, New York. 251 sh.
- Bilgin, N., (1982). The Cuttability Of Evaporites. *Bulletin of the International Association Of Engineering Geology*, 25, 85-90.
- Bilgin, N., (1989). İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği, Birsen Yayınevi, 139-140, İstanbul.
- Bilgin, N., (1994). Yeraltı Kazılarında Mekanizasyon, *Ulaşımında Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu*, TMMOB Maden Müh. Od. Yayını, 53, Aralık, İstanbul.
- Bilgin, N., Kuzu, C., Eskikaya, Ş. ve Özdemir, L., (1997). Cutting Performance of Jack Hammers and Roadheaders in Istanbul Metro Drivages, *World Tunnel Congress 97*, Balkema, ISBN 90 5410 8681, 455-460
- Bilgin, N. Seyrek, T., Erdinç, E. ve Shahriar, K., (1990). Roadheaders Glean Valuable Tips For Istanbul Metro. *Tunnels And Tunneling*, 22, 10, 29-32, October.
- Bilgin, N., Seyrek, T. ve Shahriar, K., (1988). Roadheader Performance in İstanbul, Golden Horn Clean-Up Contributes Valuable Data. *Tunnels And Tunneling*, 20, 6, 41-44, June.
- Bilgin N., Yazıcı S. ve Eskikaya S., (1996). A Model to Predict the Performance Of Roadheaders And Impact Hammers İn Tunnel Drivages. *Proc. Eurock 96*, 715-720, Italy-Torino, Balkema.
- Breitrick, M. E., (1998). Using a Roadheader for Underground Gold Mining, *Mining Engineering*, 43-46, March.
- Çopur H., (1999). Theoretical And Experimental Studies of Rock Cutting with Drag Bits Towards the Development of a Performance Prediction Model for Roadheaders. *Ph.D. Thesis*, Colorado School of Mines, 362 pp, USA-Colorado-Golden.

- Çopur, H., Tunçdemir, H., Bilgin N., ve Dinçer T., (2001). Specific Energy as a Criterion for the Use of Rapid Excavation Systems in Turkish Mines, *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect.A: Min. Technol.)*, **110**, A149-157, ISSN 0371-7844.
- Eskikaya Ş., Bilgin N., Dinçer T. ve Özdemir, L., (1998). A Model to Predict the Cutting Performance of Rapid Excavation Systems. *Proc. the Seventh International Symp. on Mine Planning and Equipment Selection*, 575 sf., Calgary, Balkema.
- Fowell, R. J., (1993). The Mechanics of Rock Cutting. *Compressive rock engineering*, Pergamon press, 155-176.
- Hartman, H. L., Breeds, C. D. ve Conway, J. J., (1992). Rapid Excavation, *SME Mining Engineering Handbook* Chapter: **22.1**, 1876 sf.
- Hurt K. G., Morris C. J. ve Mac Andrew K. M., (1982). The Design and Operation of Boom Tunneling Machine Cutting Methods. *14th Canadian Rock Mech. Symp.*, CIM Special **30**, 54-58.
- Mc Feat-Smith, I., ve Fowell R. J., (1977). Rock Property Testing and Cutting Performance Of Tunnelling Machines, *Tunnels and Tunnelling*, 29-32, March.
- Mc Feat-Smith, I. ve Fowell R. J., (1979). The Selection and Application Of Roadheaders For Rock Tunnelling, *Proceeding of rapid excavation and tunnelling conference*, **1**, 261-269, USA.
- McFeat-Smith I. ve Fowell R. J. (1977). Correlation of Rock Properties and the Cutting Performance of Tunnelling Machines. *Proc. Conference on Rock Engineering*, The University of Newcastle Upon Tyne, 581-602, UK.
- Nizamoğlu, S., (1978). Contribution a L'étude du Fonctionnement des Tunelliers "Plain Section" Et Analyse de L'usure de Leurs Outils de Coupe. These Pour Obtenir Le Grade de Docteur Ing. Ecole des Mines, 139 sf., Nancy.
- Özdemir, L., (1994). Mekanik Kayaç Kazısı Prensipleri, *Tünel ve Galeri Açma Meslek İçi Eğitim Semineri*, İ.T.Ü. Maden Fakültesi, Editör: Prof. Dr. Şinasi ESKİKAYA, s.32, Ekim.
- Pakes., G., (1991). Selection of Methods, *World Tunnelling*, Nov., 32 pp.
- Rostami J., Ozdemir L. ve Neil, D. M., (1994). Performance Prediction: A Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining. *Mining Engineering*, 1263-1267, November.
- Rostami J. ve Ozdemir L., (1994). Roadheaders Performance Optimization for Mining And Civil Construction, *Proceedings of the 13th annual technical conference, Institute of Shaft Drilling Technology (ISDT)*, 18-21, Las Vegas, Nevada, April.
- Rostami, J., Neil, D.M. ve Özdemir, L., (1993). Roadheader Application for the Yucca Mountain Experimental Study Facility, CSM, Final report, Nevada, USA.
- Roxborough, F.F., (1973). Cutting Rock with Picks, *The Mining Engineer*, 445-454, June.
-
- Sullivan, D.E., Sznoppek, J.L. ve Wagner L.A., (2001). 20th Century U.S. Mineral Prices Decline in Constant Dollars, *USGS, Open File Report: 00-389*. <http://minerals.usgs.gov/minerals/>.