

# MADENCİLİK

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI DERGİSİ

THE JOURNAL OF THE CHAMBER OF MINING ENGINEERS OF TURKEY

MART-HAZİRAN

CİLT

SAYI

MARCH-JUNE

VOLUME

NUMBER

2014

53

1-2

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Ekin KÖKEN	3	<b>ZONGULDAK TAŞKÖMÜRÜ HAVZASI UZUNAYAKLARI İÇİN BİR TAVAN GÖÇEBİLİRLİK SINIFLAMASININ GELİŞTİRİLMESİ</b> <i>Development of a Cavability Classification for the Longwalls in Zonguldak Hardcoal Basin</i>
Hasan HACİFAZLIOĞLU Dilara UÇKAN	21	<b>BORİK ASİT LIÇI İLE TOSYA LİNYİT KÖMÜRÜNDEN KÜL ve KÜKÜRT GİDERİMİ</b> <i>Ash and Sulfur Removal from Tosya Lignite Coal with Boric Acid Leaching</i>
Serdar YAŞAR, Mehmet ÇAPİK, Ali Osman YILMAZ	31	<b>SCHMIDT SERTLİĞİ İLE KESİLEBİLİRLİK PARAMETRELERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN İNCELENMESİ</b> <i>Investigation of Relationships between Cuttability Parameters and Schmidt Hardness</i>
Meryem GÖKTAŞ, Murat ERDEMOĞLU	39	<b>AŞIRI ÖĞÜTMEYLE MEKANİK OLARAK AKTİFLEŞTİRİLMİŞ ATIK MERMER TOZLARI KULLANILARAK YAPAY VOLLASTONİT ÜRETİMİ ve KULLANIMI</b> <i>Production and Utilization of Synthetic Wollastonite by using Waste Marble Powders Activated Mechanically via Intensive Milling</i>

**MADENCİLİK** dergisi yazı dizin ve özetlerinin yer aldığı veri tabanları / INDEXED in **IMM Abstracts, GeoRef, Aluminium Industry Abstracts, Cambridge Scientific Abstracts, PASCAL, Chemical Abstracts, ENCOMPLIT, ENCOMPLIT2, ENERGY, Compendex**

### Abone Koşulları:

Yıllık abone bedeli 100,00 TL'dir.

### Subscription

Annual subscription rate is 100,00 TL. All subscription inquiries should be made to the correspondence address.

### Banka Hesap No:

Türkiye İş Bankası Meşrutiyet Şubesi:  
IBAN: TR43 0006 4000 0014 2130 008120

T.C. Ziraat Bankası Kızılay Şubesi:  
IBAN: TR19 0001 0006 8539 0090 315001

Posta Çeki Hesap No: 86665

### By bank transfer to (USD account)

Türkiye İş Bankası Meşrutiyet Branch,  
Kızılay - Ankara  
Swift Code : ISBKTRISXXX  
IBAN- TR860006400000242130774805

### By bank transfer to (EURO account)

Türkiye İş Bankası Meşrutiyet Branch,  
Kızılay - Ankara  
Swift Code : ISBKTRISXXX  
IBAN- TR190006400000242130784644

ISSN: 0024-9416



## ZONGULDAK TAŞKÖMÜRÜ HAVZASI UZUNAYAKLARI İÇİN BİR TAVAN GÖÇEBİLİRLİK SINIFLAMASININ GELİŞTİRİLMESİ

### *Development of a Cavability Classification for the Longwalls in Zonguldak Hardcoal Basin*

Ekin KÖKEN\*

#### ÖZET

Uzunayak madenciliğinde ayak arkasının göçmesi, etkin bir tabaka kontrolünün sağlanması, üretim verimliliğinin artırılması ile can ve mal kayıplarının en aza indirilmesi açısından oldukça önemlidir. Yaygın olarak arına paralel ahşap tahkimatın uygulandığı Zonguldak Havzası uzunayaklarında bu konu daha da önem kazanmaktadır. Bu çalışma iki bölüm halinde hazırlanmış olup çalışmanın birinci bölümünde, öncelikle uzunayaklardaki göçme mekanizması özetlenmiş ve mevcut tavan göçebilirliği sınıflamaları gözden geçirilmiştir. Sonra, göçmede etkili olan değiştirgeler toplanmış ve bir dizin halinde sunulmuştur. Daha önceden önerilmiş tavan göçebilirlik sınıflamaları özetlenmiş ve sınıflama sistemlerinde kullanılan değiştirgeler oransal olarak irdelenmiştir. Daha önce önerilen göçebilirlik sınıflamaları ışığında Zonguldak Taşkömürü Havzası uzunayakları için bir göçebilirlik sınıflaması önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen göçebilirlik sınıflaması bazı seçilmiş ayaklara uygulanmış ve diğer göçebilirlik sınıflamaları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak önerilen göçebilirlik sınıflamasının diğer sınıflama sistemleri ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Göçebilirlik, Uzunayak Madenciliği, Tabaka Kontrolü,

#### ABSTRACT

Cavability of the goaf in longwall mining is rather important to maintain an effective ground control, to minimize the loss of life and property and to increase the efficiency of production. This case becomes quite important in the longwalls of the Zonguldak Basin, where timber support is extensively used parallel to the coal face. This study is prepared as of two parts; in first part of the study, first, caving mechanism of the longwalls is summarized. After that; the effective parameters for caving are mentioned and presented in a sequence. Roof caving classifications previously proposed are summarized and the parameters used in classification systems are proportionally examined. In the light of the caving classifications previously proposed, a modified roof caving classification system is proposed for the longwalls in Zonguldak Hardcoal Basin. The classification system proposed in this study, has been applied to some selected longwalls and has been compared with other roof caving classification systems. Consequently, the proposed classification system has been seen in conformity with the other classification systems.

**Keywords:** Cavability, Longwall Mining, Strata Control

\* Arş. Gör., Bülent Ecevit Ün., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., ZONGULDAK, ekin.koken@beun.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Uzunayak madenciliğinde ayak arkasının göçmesi ve/veya göçertilmesi, etkin bir tabaka kontrolünün sağlanması, üretim verimliliği ile can ve mal kayıplarının en aza indirilmesi açısından oldukça önemlidir. Yaygın olarak arına paralel ahşap tahkimatın uygulandığı Zonguldak Havzası uzunayaklarında bu konu daha da önem kazanmaktadır. Ayak arkasının göçmesi, yani yalancı tavanın son domuzdamı arkasından kırılması, arının ve tahkimat ünitelerinin aşırı yüklenmesinin önlenmesi açısından hayati önem arz etmektedir. Zor göçebilen veya göçmeyen bir yalancı tavanın ayak ilerlemesine bağlı olarak kırılmayı, tahkimat ünitelerini aşırı tavan yüklerine ve arının yüksek ikincil gerilmelere maruz kalmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak, arın patlamaları ile göçük olaylarının bu bölgelerde sıklıkla görülmesi olasıdır. Bu açıdan bakıldığında, ayak arkasının göçmesi ve/veya göçertilmesinin etkin bir tavan kontrolü için ne denli önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Göçertmeli bir uzunayak tasarımında göçme mekanizmasının araştırılması ve tanımlanması için öncelikle yalancı tavan kalınlığının veya göçme yüksekliğinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Kömür damarı üzerinde yer alan tavan tabakalarının gözlemlenememesi ve göçme mekanizmasının ortamdaki ortama değişkenlik göstermesi, göçme olayının tam olarak anlaşılmasını güçleştirmektedir. Aynı zamanda, araziden veri toplamanın zorluğu sebebiyle, göçme olayının tanımlanması, genellikle yarı-kuramsal ve/veya kuramsal yaklaşımlar ile açıklanmaktadır (Ghose 1976).

Kuramsal yaklaşıma göre; uzunayakta başyukarı sürüldüğünde, arazi basıncının dağılımı bakir bir ortamda açılmış galerideki basınç dağılımına benzetilebilir. Daha açık bir ifade ile; yeraltında, tavan ve taban tabakaları arasında yer alan kömür damarı ve çevresi üretime hazırlanmadan önce doğal arazi gerilmeleri altındadır. Eğimli kömür damarlarında sürülen alt ve üst tabanyollarının bir başyukarı ile birleştirilmesi ile birincil gerilmelerin doğrultu ve büyüklükleri değişerek ayak çevresinde ikincil gerilmeler meydana gelmektedir. Kazılan kısım tarafından sağlayan desteğin ortadan kalkması ile tavan çevresinde oluşan ikincil gerilmelerin etkisinden kurtulan tavan tabakalarında kendi ağırlığı altında sarkma gösteren giriş davranışı nedeniyle eğilme ve deformasyonlar artacaktır.

Ayak ilerledikçe de ayak gerisinde kalan tavan tabakaları belirli aralıklarla göçecektir (Şekil 1). Bu olaya uzunayak madenciliğinde "Ayak Arkasının Göçmesi" denmektedir.

İlerletimli veya dönümlü uzunayak madenciliğinde arın ilerlemesine bağlı olarak meydana gelen göçme olayı:

- i. Temel göçme mekanizmasının tanımlanması
- ii. Göçertme işlemleri ve uygulamaları
- iii. Fiziksel modeller ile tavan tabakalarındaki yenilme ve deformasyonların kestirimi
- iv. Göçmenin neden olacağı yeryüzü alçalmalarının (tasman) etkisi kapsamlarında incelenir (Jeremic 1985).

Göçme mekanizması, göçecek blokların geometrisi ve yalancı tavan tabakasının kalınlığı ( $h_{im}$ ) dikkate alınarak tanımlanır. Tavan taşının sağlamlığı, kayaçların laboratuvar ve arazi deneyleri ile araştırılarak kaya malzemesi ve kaya kütlelerine ait fiziko-mekanik özelliklerin ortaya konması ile belirlenmektedir. Tavandan su geliri, göçmenin büyüklüğünü ve blok boyutunu etkilediğinden ayak boyunca yeraltı suyu haritalarının hazırlanması kritik yapısal bölgelerin çıkartılması konusunda yardımcı olabilir. Yalancı tavan tabakası kalınlığının belirlenmesi, ise arazide düzenli olarak yapılan yük ölçümleri ve görgül bağıntılar ile karşılaştırarak ortaya konulmalıdır. Askıda kalan kaya blokları ile göçen kaya bloklarının hacimsel büyüklüklerinin karşılaştırılması tavan taşının kırılma mekanizmasının açıklanması hakkında bilgi verebilir (Siska 1972).

Sağlam tavan taşlarının olduğu bölgelerde (sert kumtaşı, konglomera ve kalın tabakalı kömür çevre kayaçlarının olduğu bölgelerde), ayak arkasının kendiliğinden göçmesi uzun zaman alabilir ve çoğu kez ayak arkasındaki tavan tabakaları kendiliğinden göçmez. Böyle durumlarda, kontrollü patlatma ile ayak arkası göçertilerek arazideki gerilme kontrolü sağlanır. Bu sebepten göçertmeli uzunayak madenciliğinde tavan tabakalarının düzenli bir şekilde kırılması istenir (Birön ve Arıoğlu 1999).

Göçme olayının laboratuvarında incelenmesinde bir başka araştırma yöntemi ise fiziksel modellerin oluşturulmasıdır. Uzunayak madenciliğinde tabaka kontrolü ve göçük araştırmalarında fiziksel modeller, en çok kullanılan çalışma tekniklerinden bazılarıdır.

Bu kapsamda Jacobi (1981), Jeremic (1985)

ve Singh ve Singh (1999) göçük mekanizmasının araştırılması için ölçekli uzunayak modelleri oluşturarak farklı yüklemeler ile göçme olayını kavramsal olarak açıklamaya çalışmışlardır.

Eğer uzunayak madenciliği yerleşim yeri altında yapılıyor ise göçüğün yüzeye etkisi ve binalarda olası hasarların belirlenmesi etraflıca araştırılmalıdır. Bu konuda Whittaker ve Jeremic (1979), Whittaker ve Breed (1977) ve Brauner (1973) uzunayak madenciliğinde göçüğün yüzeye etkisi ile ilgili ilk yaklaşımları ortaya koymuşlardır.

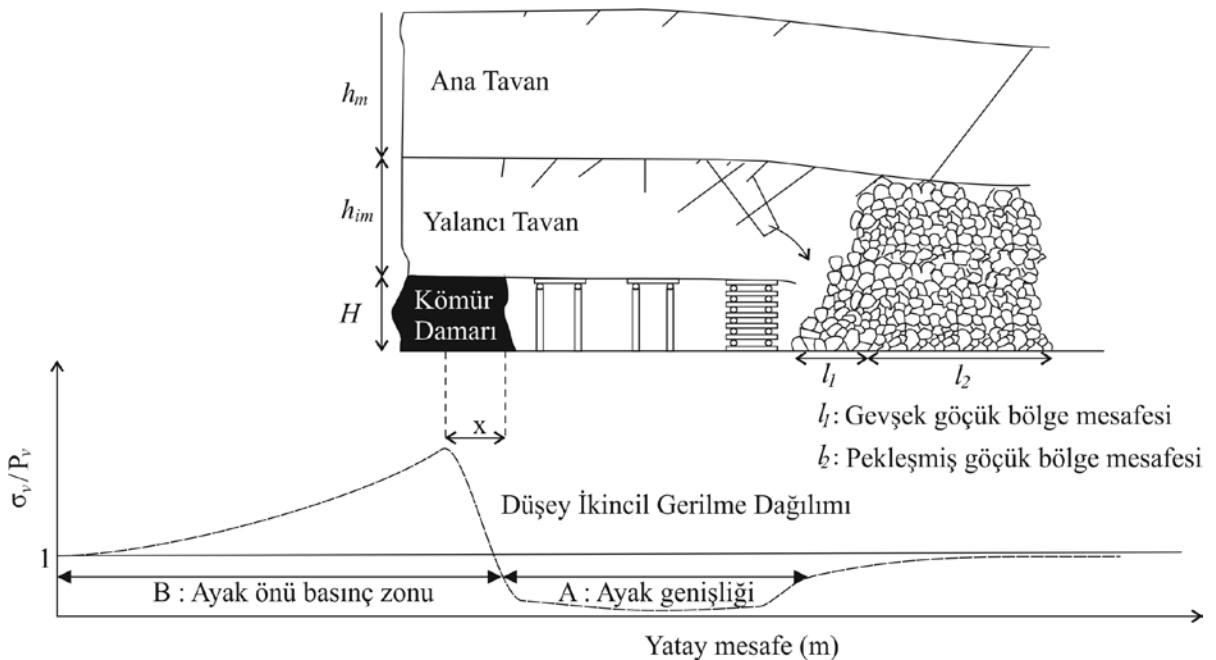
Jeremic'e (1985) göre göçük araştırmaları yuvarıda özetlenen dört kapsamda incelenmelidir. Bu konular dışında tavan tabakalarının eğilme miktarlarının arazide ölçülmesi göçüğün boyutlarının ve yalancı tavanın kırılma mesafesinin belirlenmesinde değerlendirilebilir. Söz konusu sistem tek mesnetli ankastre giriş sistemine benzediğinden, göçmenin başka bir ifade ile tavan tabakalarının yenilmeleri inşaat mühendisliğindeki giriş çözümlenmesi ile belirli idealleştirmeler yapılarak analitik ve/veya sayısal olarak çözümlenebilir (Whittaker ve Reddish 1989, Diedrichs ve Kaiser 1999).

Göçme olayında; yalancı tavan tabakasının fiziko-mekanik özellikleri, süreksizlik durumu, yeraltı suyu durumu ve tavan tabakasının kalınlığı birinci derecede önemlidir. Yalancı tavan tabakasının kalınlığı göçmeyi zorlaştırmakta buna

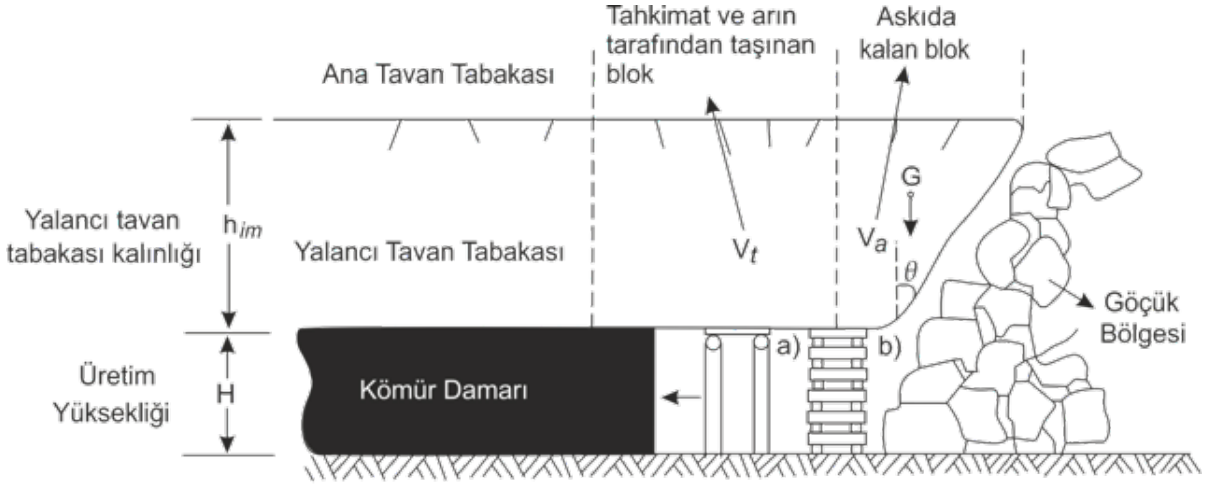
karşın süreksizlik içeren ve nispeten daha ince katmanlı tavan tabakalarının daha kolay göçmesi beklenmektedir. Basit olarak, yalancı tavanın eğilerek gerçekleştiği kırılma olayında; Şekil 2'de askıda kalan tavan bloğunun ağırlık merkezi (G noktası) görülmektedir. Ayak ilerledikçe askıda kalan, başka bir ifade ile, göçmeyen giriş şeklindeki tavan bloğunun hacmi artmakta ve ilerleme yönüne doğru tavan bloğunun ağırlık merkezi ötelenmektedir. Askıda kalan kaya bloğunun ağırlık merkezi domuzdamının düşey ekseninden ayrıldığı tavan bloğunda deformasyon ve eğilmeler artacak ve sonunda tavan taşı statik koşullar altında göçecektir.

Su geliri birinci derecede etkileyen tavan tabakasının içerdiği süreksizlikler (tabakalanma, yapraklanma düzlemi, eklem takımları vb.) göçme olayının fiziksel olarak boyutlandırılmasını belirleyen diğer bir etkidir.

Göçmeye etki eden bir başka faktör de, yalancı tavan tabakası üzerindeki ana tavan tabakasıdır. Ana tavan tabakası yalancı tavan üzerinde ölü bir yük oluşturmaktadır ve bu yüklemeye göçmeyi kolaylaştırmaktadır. Göçme olayına etki eden faktörler göçme mekanizmasını ve göçmenin boyutlarını belirlemekle kalmaz; Örneğin, göçmeyen tavanlarda tabaka kontrolü problemleri dikkate alınacağından bu dönemlerde üretim yapılamaz. Böylece işletmenin günlük üretim hızı genellikle düşer.



Şekil 1 Uzunayak tavanındaki düşey ikincil gerilmelerin damar tabanında ve arına dik bir kesit doğrultusundaki dağılımı (Birön ve Arıoğlu 1999'dan değiştirilerek).



**Açıklamalar:** a) Ahşap Direkler b) Domuzdamı

Şekil 2 Uzunayak madenciliğinde göçme olayı ile ilgili genel kavramlar.

## 2. AYAK ARKASININ GÖÇMESİNİ ETKİLEYEN ETMENLERİN SINIFLANDIRILMASI

Daha geniş bir açıdan ise, ayak arkasının göçebilirliği üç ana başlık altında incelenebilir. Bunlar; bölgesel jeolojik etkenler, tavanın jeomekanik özellikleri ve kömür üretimine bağlı diğer değişkenlerdir (Çizelge 1).

Jeolojik etkenler; bölgenin tektonizması, hidro-jeolojik özellikleri ile kömür ve çevre kayaların olduğu sedimanter ortam ile ifade edilir. Öncelikle kömür oluşumu için uygun bir sedimanter ortamın (sediman taşınma hızı düşük ve sakin bir ortam) varlığı gereklidir. Uygun sedimanter ortamda çökelen organik malzemelerin taşlaşması ile farklı damar kalınlıklarına sahip kömürler oluşmaktadır.

Devam eden sedimantasyon ile de, hem kömürün kalitesi (rankı) hem de konumlandığı derinlik yani üretim derinliği gibi değişkenler kendini gösterir. Bölgenin geçirdiği tektonik hareketler ise (tektonizma, orojenez vb.), damarın eğimlenmesini ve kömür havzasındaki fayları kontrol eder. Ayrıca tavan katılık durumu ve eklemlilik derecesi de bir bakıma bölgenin tektonik hareketlerine bağlıdır. Hidrojeolojik özellikler ise, uzunayağa gelecek olan su geliri ile yeraltı suyunun akış yönü ve hızını belirlemesi açısından önemlidir.

Tavan tabakalarının jeomekanik özellikleri ise; kaya malzemesi ve kütlelerinin dayanım özellikleri, (tek eksenli ve üç eksenli basınç, tek eksenli veya dolaylı çekme dayanımı) ile tavan katılığı, kayaların elastik sabitleri (deformasyon modülü

ve Poisson oranı) ve kömür çevre kayalarının suya olan hassasiyeti olarak tanımlanabilir. Bu mekanik özellikler, göçme davranışını, yalancı ve ana tavanın kırılma mesafelerini etkilemektedir.

Teknolojik değişkenler; kömür üretimine uygun olarak belirlenen ölçütler olup genel olarak; uygun tahkimat tasarımı, domuzdamı katılığı, delme-patlatma ve üretim hızı olarak tanımlanabilir. Uygun tahkimatın tasarlanması ile ayak arkasının göçmesinin kolaylaşması amaçlanmaktadır. Ahşap tahkimat ile çalışan ayaklarda, domuzdamı katılığı bu açıdan oldukça önemli bir özellik olmaktadır. Sert kömürlerin olduğu formasyonlarda kömürün kazılabilmesi ve sert tavan tabakalarının göçertilmesi için zaman zaman patlatma yapılmaktadır. Yapılan kontrollü patlatmalar ile tavan tabakalarının göçertilmesi hem tabaka kontrolünü hem de üretim hızını etkilemektedir.

Söz konusu üç ana gruptan alınan çeşitli elemanların bir bileşkesi olarak gerçekleşen ayak arkasının göçmesi, yalancı tavanın kırılma mesafesi ve göçme davranışına etki eden faktörleri bir arada sunmak, konuya bütünlük kazandırmak için gereklidir. Çizelge 1'de ifade edilen gruplardan jeolojik özellikler kontrol edilemez, tavan kayalarının jeomekanik özellikleri kısmen kontrol edilebilir ve kömür üretimine ilişkin değişkenler ise genellikle kontrol edilebilir büyüklükler olarak tanımlanabilir. Arazide damar eğimi, doğrultusu, kalınlığı, üretim derinliği gibi değişkenler kontrol edilemeyen büyüklüklerdir.

Yani üretim öncesi ve sonrasında değiştirilemez. Tavan tabakalarının jeomekanik özellikleri ise, göçmeyen veya zor göçen tavanlarda kontrollü patlatma ile azaltılarak gerektiğinde değiştirilebilir. Bu sebepten ikinci kategoride yer

alan jeomekanik özellikler yarı kontrol edilebilir büyüklükler arasında yer almaktadır. Üretim ile ilgili değişkenlerde ise tamamen insan faktörü rol oynadığından bu değişkenler kontrol edilebilir büyüklükler olarak tanımlanır.

Çizelge 1 Ayak Arkasının Göçmesinde Etkili Olan En Genel Değişirgeler (Das, 2000'den düzenlenerek).

		JEOLJİK ÖZELLİKLER		
		SEDİMANTOLOJİK	TEKTONİK	HİDROJEOLJİK
KONTROL EDİLEMEZ	I. GRUP	Kömürün çeşidi		
		Damar kalınlığı	Tektonik çatlaklar	Mümkün akiferler
		Litolojik değişkenlik	Damar eğimi	Yeraltı suyu hareketi*
		Sekans Stratigrafisi	Faylar	
		Üretim Derinliği	Kıvrımlar	Su geliri*
TAVAN TABAKALARININ JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİ				
KİSMEN KONTROL EDİLEBİLİR	II. GRUP	KAYA KÜTLESİ		
		Dayanım ve deformasyon özellikleri	kontrollü patlatma ile azaltılabilir.	
KÖMÜR ÜRETİMİNE İLİŞKİN DEĞİŞKENLER				
KONTROL EDİLEBİLİR	III. GRUP	Tahkimat tasarımı		
		Domuzdamı katılığı		
		Üretim ile oluşan ikincil çatlaklar		
		Tahkimatın doğru ve zamanında sökülmesi		
		Üretim hızı		

\* Gerektiğinde kontrol edilebilir.

### 3. LİTERATÜRDE YER ALAN TAVAN VE GÖÇEBİLİRLİK SINIFLAMALARI

Bu bölümde ayak arkasının göçebilirliği konusunda literatürde yoğun olarak kullanılan tavan ve göçebilirlik sınıflamalarında yer tutan değişirgeler özetlenerek, bu sınıflama sistemlerinde kullanılan değişirgelerin önem sıraları ortaya konulmuştur. Ayak arkasında kullanılan önemli değişirgelerin ortaya çıkartılmasıyla bu çalışmada önerilen göçebilirlik sınıflamasında kullanılan değişirgeler belirlenmiştir.

#### 3.1 Bilinski ve Konopko Yaklaşımı

Ayak arkasının göçebilirliği konusunda yapılmış önemli çalışmalardan ilki Bilinski ve Konopko Yaklaşımı'dır. Bilinski ve Konopko (1973, 1974),

Polonya kömür madenlerinde yaptıkları deneysel çalışmalarda statik yükler altındaki tavan taşlarının gevşeme ve kırılma özelliklerini "Tavan İndeksi Puanlaması" olarak tanımlamışlardır (Eşitlik 1).

$$L_c = 0,321 \times \sigma_c^{1,7} \times (K_1 \times K_2 \times K_3) \quad (1)$$

Burada  $L_c$  tavan indeks puanı,  $\sigma_c$  boy/çap oranının 1 olduğu tavan taşının tek eksenli basınç dayanımını (MPa),  $K_1$ ,  $K_2$  ve  $K_3$  çarpanları da farklı litolojilerdeki bazı tavan taşlarının önemli mekanik özelliklerini ifade etmektedir.  $K_1$  çarpanı kayacın yerinde basınç dayanımının kestirimini,  $K_2$  çarpanı kayacın zamanla yorulma özelliğinin bir göstergesini,  $K_3$  çarpanı ise kayacın suya olan

hassasiyetinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır (Çizelge 2)

Tavan indeks puanı  $L_c$ 'nin belirlenmesiyle Çizelge 3'e göre tavan göçebilirliği bu yaklaşıma göre belirlenir.

Çizelge 2  $K_1$ ,  $K_2$  ve  $K_3$  Çarpanlarının Çeşitli Kayaçlar İçin Aldıkları Değerler (Unrug 1983).

Litoloji	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Kiltaşı	0,50	0,60	0,50
Silttaşı	0,42	0,60	0,50
Kumtaşı	0,33	0,70	0,60

Çizelge 3 Tavan Endeks Puanına Göre Tavan Taşlarının Göçebilirlik Sınıflandırılması (Bilinski ve Konopko 1973'ten değiştirilerek).

Sınıf	Tavan İndeks Puanı, $L_c$	Tavan Taşı Litolojisi	Göçebilirlik	Tavanın Etki Alanı ( $m^2$ ) <sup>*</sup>	Arından yaklaşık uzaklık (have) <sup>**</sup>
I	0 - 18	Tabakalı silttaşı, su içeren bol çatlaklı ayrılmış tavan	Küçük bloklar halinde kendiliğinden göçme	1	1 - 1,5
II	18 - 35	Kırıklı, parçalı silttaşı, kilttaşı, su içeren zayıf tavan taşları	Kolay	1 - 2	1,5 - 2
II	35 - 60	Silttaşı, çamurtaşı, orta dayanımlı kumtaşı ve marn	Orta	2 - 5	2 - 3
IV	60 - 130	Sert silttaşı, çamurtaşı, orta dayanımlı kumtaşı, konglomera	Zor	5 - 8	3 - 4
V <sub>a</sub>	130 - 250	İnce taneli kumtaşı, pekleşmiş konglomera, sağlam kireçtaşı	Patlatma ile göçertilir.	8	> 4
V <sub>b</sub>	> 250				

\* Yalancı tavanın tahkimatsız durabilme alanı

Açıklamalar

\*\* Göçmenin başlayacağı yaklaşık mesafe (1 have  $\approx$  0,5 - 2 m)

### 3.2 Singh ve Singh Yaklaşımı

Singh ve Singh., 1988'den beri uygulanan Hindistan kömür madeni uzunayaklarında yürüttükleri çalışmalar sonucu tavan tabakalarını göçebilirlik açısından sınıflamışlardır (Çizelge 4). Araştırmacıların önerdikleri tavanın göçebilirlik endeks puanını ( $I_h$ ) belirlemede kullanılan görgül bağıntı, yalancı tavan tabakasının kaya kalite göstergesi (RQD, %), tavan tabakasının tek eksenli basınç dayanımı ve tabaka kalınlığı gibi değiştiğeleri içermektedir (Bkz. Eşitlik 2).

$$I_h = 0,2 \times \sigma_{ci} \times F_l^g \times h_b^{0,5} \quad (2)$$

Burada  $I_h$  tavan tabakasının göçebilirlik endeks puanı,  $\sigma_{ci}$  tavan tabakasının tek eksenli basınç dayanımı (MPa),  $F_l$  RQD hesaplamalarındaki ortalama karot parça boyu (mm),  $n$  üstel bir katsayı ( $RQD \geq 80$  g = 1,2,  $RQD < 80$  g = 1) ve  $h_b$  ise ortalama tavan tabakası kalınlığını (m) ifade etmektedir.

Ortalama karot parça boyu (FI) ise Bikermann ve Mahtab (1986) tarafından önerilen eşitlikler yardımı ile belirlenmektedir (Bkz. Eşitlik 3)

$$F_l = e^{3,75+0,015(RQD)} \quad (3)$$

Eşitlik 3'teki FI değerinin birimi mm ve RQD % cinsindedir.

Çizelge 4 Göçebilirlik İndeks Puanına Göre Tavan Göçebilirlik Sınıflaması (Singh ve Singh 1999).

Tavan Sınıfı	Göçebilirlik	Göçebilirlik İndeksi Puanı, $I_h$
I	Kolay	< 2000
II	Normal	2001 - 5000
III	Zor	5001 - 10000
IV	Çok Zor	10001 - 14000
V	Patlatma ile	> 14000



### 3.3 Mark ve Molinda Yaklaşımı

Mark ve Molinda (1993), ABD kömür madenlerinde yaptıkları çalışmalarda tavan tabakalarının jeolojik ve mühendislik özelliklerini kullanarak tavan tabakalarını sınıflamışlardır (Coal Mine Roof Rating; CMRR). Tavan tabakalarının duraylılığının sayısal bir ölçüsü olarak geliştirilen tavan puanlama sistemi, madencilik uygulamalarında kendine önemli ölçüde yer bulmuştur (Forgeron vd. 2001). Sınıflama sistemi tavan taşlarının temel fiziksel ve mekanik özellikleri temel alınarak yapılmıştır.

Temel tavan puanlama sınıflamasında girdi parametreleri aşağıdaki gibidir:

- Tavanın tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{ci}$ ) veya düzeltilmiş eksenel nokta yükü dayanımı ( $I_{s50\perp}$ ),
- Tavan tabakalarının temel süreksizlik özellikleri (RQD, pürüzlülük, aralık, devamlılık ve süreksizlik yüzeyinin kesme dayanımı)

Yukarıda ifade edilen değiştirgelere ait puanlamalar sonucu Mark ve Molinda (2004) tavan tabakalarını duraylılık açısından sınıflandırılmıştır (Çizelge 5). Sınıflandırmada kullanılan değiştirgerelere ait puanlama ve detaylara Mark ve Molinda (2004)'ten ulaşılabilir.

Çizelge 5 Kömür Madenciliğinde Tavan Puanı Sınıflaması (Mark ve Molinda 2004).

CMRR Sınıfı	Puan Aralığı	Tipik Tavan Litolojisi
Çok Duraylı	CMRR > 65	İnce T. Kumtaşı, Konglomera
Duraylı	65 > CMRR > 55	İnce T. Kumtaşı, Silttaşı
Orta Duraylılıkta	55 > CMRR > 45	Orta T. Kumtaşı, Silttaşı
Az Duraylı	45 > CMRR > 35	Çamurtaşı, Kilttaşı
Duraysız	CMRR < 35	Şeyl, Kilttaşı

### 3.4 Laubscher Yaklaşımı

Laubscher (1990), RMR89 sınıflama sistemini tavan tabakalarının göçebilirliği açısından kullanarak bir tavan göçebilirlik sınıflaması önermiştir.

Beş farklı RMR sınıfı için önerilen sınıflamada çatlaklı bölge çapı ve çatlaklılık karakteristikleri ve tavan tabakalarının göçebilirlik durumları ifade edilmiştir (Çizelge 6).

Çizelge 6 Laubscher Tavan Göçebilirliği Sınıflaması (Laubscher'dan düzenlenerek 1990).

Tavan Sınıfı	I	II	III	IV	V
RMR <sub>89</sub> Puanı	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0
Göçebilirlik	Çok Zor	Zor	Orta	Kolay	Çok Kolay
Ayak Arkası Kırılma Mesafesi, $l_m$ (m)	20 - 3	9 - 1,5	5 - 0,4	2 - 0,1	≤ 0,3

### 3.5 Çin Tavan Sınıflaması

Çin Tavan Sınıflaması, Çin kömür havzasındaki kömürler için Hongzhu (1996) tarafından geliştirilmiştir. Çin Tavan Sınıflaması'na göre yalancı ve ana tavanı dört alt grup olmak üzere gruplandırmışlardır. Buna göre yalancı tavan kendi arasında Tip A, B, C ve D olmak üzere, ana tavan ise I., II., III, ve IV. tip olmak üzere gruplara ayrılmaktadır. Yalancı tavan sınıflamasında dayanım endeks puanı ( $D_c$ ) göz önünde bulundurulmakta ve bu puan Eşitlik 4 ile belirlenmektedir.

$$D_c = \sigma_{ci} \times c_1 \times c_2 \quad (4)$$

Burada  $\sigma_{ci}$  kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa),  $c_1$  ve  $c_2$  değerleri ise sırasıyla çatlak aralığı puanı ve ortalama tabaka kalınlığına göre belirlenen çarpanlar olarak tanımlanmaktadır.

Tavan tabakalarının çatlaklılığı bir ölçütü olarak tanımlanan  $c_1$  çarpanı ortalama çatlak aralığının (Jim) bir fonksiyonu ve  $c_2$  çarpanı ise yalancı tavan kalınlığının (hb) bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Buna göre  $c_1$  ve  $c_2$  çarpanının değerleri farklı jeolojik koşullara göre Çizelge 7'deki gibidir.

Çizelge 7 Yalancı Tavanın Ortalama Çatlak Aralığı ( $J_{im}$ ) ve Ortalama Tavan Tabaka Kalınlığına ( $h_b$ ) Göre  $c_1$  ve  $c_2$  Katsayıları (Hongzhu, 1996).

$J_{im}$ (m)	$c_1$	$h_b$ (m)	$c_2$
0,1	0,30	0,1	0,24
0,2	0,32	0,2	0,25
0,3	0,34	0,3	0,27
0,4	0,37	0,4	0,29
0,5	0,39	0,5	0,30
0,6	0,41	0,6	0,32
0,7	0,43	0,7	0,33
0,8	0,46	0,8	0,35
0,9	0,48	0,9	0,36
1,0	0,50	1,0	0,38
1,1	0,52	1,1	0,39
1,2	0,55	1,2	0,41

Dayanım indeksi puanına göre yalancı tavan dört gruba ayrılmaktadır. Tavan duraylılığı, göçebilirlik, tavan davranışı ve yalancı tavanın kırılma mesafesi gibi değişkenler hakkında dayanım indeksi puanı önemli bilgiler vermektedir (Çizelge 8).

Çizelge 8 Dayanım İndeks Puanına Göre Yalancı Tavanın Sınıflandırılması (Hongzhu 1996).

Tavan Tipi	A	B	C	D
Tavan Duraylılığı	Duraysız	Yarı Duraylı	Duraylı	Aşırı Duraylı
Tavan Endeks Puanı, $D_c$	$\leq 3$	3,1 - 7	7,1 - 12	$> 12$
Yalancı Tavan Kırılma Mesafesi, $l_{im}$ (m)	$\leq 8$	9 - 18	19 - 25	$> 25$
Göçebilirlik	Kolay	Orta	Zor	Çok Zor

Çizelge 9 Venkateswarlu et al. Tavan Sınıflaması (Venkateswarlu et al. 1989'dan düzenlenerek).

1) Tavan Dayanımı		2) Tavan Tabaka Kalınlığı		
$\sigma_{ci}$ (MPa)	Puan Aralığı	Ortalama Tabaka Kalınlığı, $h_b$ (cm)	Puan Aralığı	
$>10$	0-2	$<2,5$	0-5	
10-30	2-6	2,5-7,5	5-12	
30-60	6-10	7,5-20	12-19	
60-90	10-13	20-50	19-25	
$>90$	13-15	$>50$	25-30	
3) Tavanın Yapısal Durumu		4) Tavan Tabakasının Ayrışma-Bozunma Durumu		
Yapısal Özellik	Puan Aralığı	Ayrışma-Bozunma Duyarlılığı	$I_{d1}$ (%)	Puan Aralığı
Faylı ve bol kıvrımlı bölgeler	0-4	Çok Duyarlı	$<60$	0-3
Kayma zonları içeren bölgeler	4-10	Duyarlı	60-85	3-8
Bol eklemli bölgeler	10-16	Orta Duyarlılıkta	85-97	8-13
Az eklemli bölgeler	16-21	Düşük Duyarlılıkta	97-99	13-17
Sorunsuz bölgeler	21-25	Çok Düşük Duyarlılıkta	99-100	17-20
5) Tavan Su Geliri		6) Tavan Göçebilirlik Sınıflaması		
Yeraltı Su Durumu	Puan Aralığı	Tavan Sınıflama Puanı	Tavan Sınıfı	Tavan Göçebilirliği
Kuru	10-9	0-20	V	Çok Kolay
Nemli	9-7	20-40	IV	Kolay
Sızıntı	7-4	40-60	III	Orta
Damlama	4-1	60-80	II	Zor
Akma	1-0	80-100	I	Çok Zor

Çizelge 10 Das Tavan Duraylılığı Sınıflaması, (Das 2000'den düzenlenerek).

1) Tavan Dayanımı		2) Kaya Kalite Göstergesi, RQD		
$\sigma_c$ (MPa)	Puan Aralığı	RQD (%)	Puan Aralığı	
0-10	0-3	0-30	0-6	
10-20	3-6	30-40	6-8	
20-30	6-9	40-50	8-11	
30-50	9-15	50-70	11-16	
50-80	15-24	70-85	16-21	
>80	24-25	85-100	21-25	
3) Tavan Litolojisi		4) Tavan Yapısal Durumu		
Litoloji	Puan Aralığı	Yapısal Durum	Puan Aralığı	
Zayıf şeyl, bol çatlaklı kumtaşı, kumtaşı-şeyl ardalanması	0-3	Faylı bölgeler	0-3	
Kumlu şeyl, çatlaklı kumtaşı, kumtaşı-kiltaşı-şeyl ardalanması	3-5	Arakesme kalınlığı 0,1m'den fazla, orta sıklıkta süreksizlikler içeren tavanlar	3-7	
Zayıf kumtaşı, yakın aralıklı süreksizlikler içeren tavan tabakaları	5-7	Az çatlaklı ve ara kesme kalınlığı 0,3m'den fazla olan tavanlar	7-8	
Sert şeyl, orta dayanımlı kumtaşı	7-9	Nadiren çatlak içeren tavanlarda arakesme kalınlığı 0,4m'den fazla tavanlar	8-9	
Sert kumtaşı, ince taneli kumtaşı, kalın tabakalı kumlu şeyl	9-10	Çatlaksız ve katı tavan	9-10	
5) Tavan Su Geliri		6) Tabaka Kalınlığı		
Yeraltı Su Durumu	Puan Aralığı	Tabaka Kalınlığı	$h_b$ (m)	Puan Aralığı
Kuru	9-10	Çok kalın	>4	20-19
Nemli-Kuru	9-8	Kalın	4-3	19-16
Islak	8-7	Orta	3-2	16-11
Sızıntı	7-6	İnce	2-1	11-5
Damlama	6-4	Çok ince	1-0,35	5-2
Akma	4-0	Laminalı	0,35-0	2-0

Çizelge 11 Das Tavan Göçebilirlik Sınıflaması (Das 2000'den düzenlenerek).

Tavan Göçebilirlik Sınıflaması						
Göçebilirlik Puanı	0-20	20-36	36-52	52-72	72-93	93-100
Tavan Göçebilirliği	Çok Kolay	Kolay	Orta-Kolay	Orta	Zor	Çok Zor
Tavan Göçme Açısı, $\theta_c$ (°)	90-85	85-75	75-65	65-50	50-35	>35
Askıda Kalan Yalancı Tavan Uzunluğu (m)	0	0-0,5	0,5-1,5	1,5-3	3,-6	>6
Uygun İşletme Yöntemi	Göçertmeli	Göçertmeli	Göçertmeli	Göçertmeli, yer yer kontrollü patlatma göçertme	Kontrollü patlatma ile göçertme ve/veya dolgulu	Dolgulu

### 3.6 Venkateswarlu Tavan Sınıflaması

Venkateswarlu vd. (1989) Hindistan kömür madenlerinde yaptıkları çalışmalarda, tahkimat tasarımı ve tavan tabakalarının duraylılıklarının kestirimi için bir sınıflama sistemi geliştirmiştir. Geliştirilen sınıflama sistemi jeomekanik sınıflama sisteminin (RMR) tavan duraylılığına uyarlanması olarak düşünülebilir. Önerilen tavan duraylılığı sınıflaması beş ana değiştirgenin toplamından olmaktadır. Bu değiştirgeler; 1) ortalama tabaka kalınlığı, 2) tavan tabakalarının yapısal özellikleri, 3) Kayaçların ayrışma-bozunma durumları, 4) tavan dayanımı, 5) yeraltı suyu durumu olarak tanımlanmakta olup, bu beş değiştirgenin sistemdeki dağılımı ve puanlaması Çizelge 9'da verilmektedir.

### 3.7 Das Tavan Sınıflaması

Das (2000), Hindistan kömür madenlerinde yaptığı çalışmalarda, tavan duraylılığının ortaya konulması için bir tavan sınıflaması geliştirmiştir. Hindistan'da yaygın olarak gözlenen kömür çevre kayaçlarını; kumtaşı (ince, orta ve iri taneli), şeyl, karbonlu şeyl, laminalı kumtaşı, kumtaşı-şeyl araldanması ve kıltaşı olarak tanımlayan araştırmacı, geliştirdiği tavan sınıflamasında bu kayaçların jeomekanik özelliklerini dikkate almıştır. Sınıflama sistemi altı farklı değiştirgeden olmaktadır. Bunlar; tavan dayanımı, tavanın kaya kalite göstergesi (RQD, %), tavan litolojisi, tavan çatlaklılık durumu, tavadaki su geliri ile ortalama tabaka kalınlığı olarak sıralanabilir (Çizelge 10). Das tavan sınıflama sistemine göre tavan göçebilirliği ise Çizelge 11'e göre yapılır.

Buraya kadar derlenen yaklaşım ve sınıflama sistemlerinde tavan duraylılığı ve ayak arkasının göçebilirliğinin ortaya konmasında kullanılan değişkenler karışık olarak verilmiştir. Araştırmacıların bu değişkenleri çalıştıkları arazinin değişkenliğini göz önünde bulundurarak farklı önem sıralarına koyduğu görülmektedir.

Buna göre, yukarıda ifade edilen araştırmacılara göre tavan ve göçebilirlik sınıflamalarında en çok kullanılan değiştirgeler Şekil 4'te verilmektedir. Bu değişkenlerin tavan duraylılığı ve ayak arkasının göçmesinde ise en fazla etkili olanları, tavan tabakalarının tek eksenli basınç dayanımı, süreksizliklerin jeoteknik özellikleri (süreksizlik aralığı, devamlılığı ve pürüzlülüğü), ortalama tabaka kalınlığı, RQD, kayaçların suya olan hassasiyeti ve yeraltı su durumu olduğu Şekil 4'ten anlaşılmaktadır. Şekil 4'te sunulan çizelgenin

son satırında, ise bu çalışma ile ortaya koyulan göçebilirlik sınıflamasına ait değiştirgeler gösterilmiştir.Şekil 4'te ifade edilen değiştirler incelendiğinde, tavan tabakalarının jeolojik ve jeomekanik özelliklerinin tavan duraylılığında birinci dereceden önemli olduğu anlaşılmaktadır. Buna karşın, kömür üretimine ilişkin teknolojik unsurlar (tahkimat tasarımı, üretim yöntemi ve hızı vb.) yukarıda derlenen yaklaşımlarda yer almamaktadır. Kömür üretimine ilişkin bu önemli hususlar Zonguldak Taşkömürü Havzası için oldukça önemli olduğundan önerilen sınıflama sistemine dahil edilmiştir.

## 4. TAVAN GÖÇEBİLİRLİK SINIFLAMASININ GELİŞTİRİLMESİ

Göçebilirlik sınıflamasının geliştirilmesinde, Şekil 4'te verilen tavan göçebilirlik sınıflamalarında kullanılan değiştirgeler incelenmiş ayrıca havza için önemli olan koşullar (damar eğimi, üretim derinliği, tahkimat tasarımı vb.) da sınıflama sistemine dahil edilmiştir.

Arazi çalışmaları sonucunda ayak arkasının göçebilirliğinde en önemli değiştirgenin tavan tabakalarının içerdigi süreksizlikler olduğu görülmüştür.

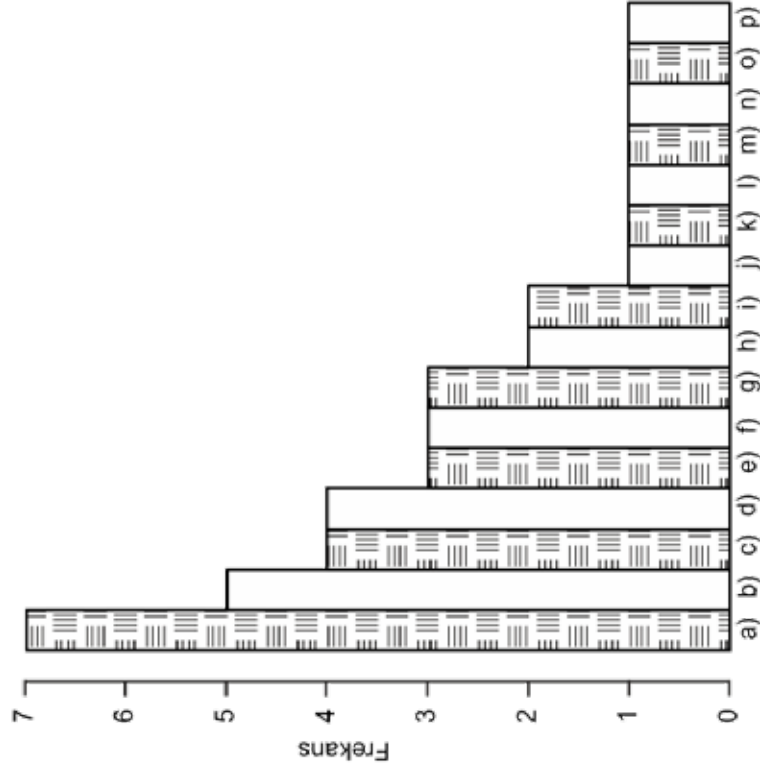
Süreksizliklerin jeoteknik özelliklerinden süreksizlik devamlılığı ve süreksizlik yüzeylerinin ayrışma-bozunma durumu tavanın göçebilirliğinde oldukça önemlidir. Süreksizlik pürüzlülüğü ve süreksizliğin dolgu durumu ise, ayak arkasının göçebilirliğinde etkili olan diğer değiştirgeler olarak tanımlanmaktadır.

Göçebilirlik sınıflamasında diğer önemli ana değiştirge ise damar-tavan özellikleridir. Damar-tavan özellikleri, yalancı tavan tabakalarının kalınlığı ve kömür damarının kalınlığını ifade etmekte olup, ayak arkasının göçmesinde ikinci önemli etken olarak tanımlanabilir.

Kömür damarı ne kadar kalın olursa yalancı tavan kalınlığı da o kadar kalın olacaktır. Yalancı tavan kalınlığı arttıkça yalancı tavanın kendi ağırlığı altında kırılacak, böylece ayak arkasını doldurması kolaylaşacaktır. Yalancı tavanın tabakanması ise, ayak arkasının göçmesini ve göçme davranışını doğrudan etkilemesi sebebiyle önemlidir. Daha açık bir ifade ile, farklı kalınlığa sahip tavan tabakalarının sıralanması da ayak arkasının göçmesinde önemli bir parametredir. Tavan tabakalanmasının az olduğu, başka bir deyişle; ince tabakalı tortul kayaçların olduğu tavanlarda göçebilirlik, tabaka ayrılmaları, küçük bloklu kaya kütlelerinin kısa aralıklarla kırılması

KULLANILAN DEĞİŞKENLER

YAKLAŞIMLAR	Tavan Dayanımı		Süreksizliklerin Jeoteknik Özellikleri		Suyun Etkisi	Kömür Damar Kayaçların Suyu Olan Hassasiyeti	Damar Eğimi	Ortalama Tabaka Kalınlığı	RQD	Yalancı Tavan Kalınlığı	Tavan Litolojisi	Zaman Etkisi
	Basınç	Aralık	Devamlılık	Pürüzlülük Dolgu Bozunma Su Gelini								
Bilinski ve Konopko (1973)	x				x						x	x
Singh et al. (1999)	x								x	x		
Mark ve Molinda (2003)	x	x	x		x				x		x	
Hongzhu (1996)	x							x				
Venkateswarlu et al. (1989)	x											
Das (2000)	x	x	x		x				x			x
Bu Çalışma (2013)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x



AÇIKLAMALAR

- a) Tavan Dayanımı  
b) Süreksizlik Aralığı  
c) Kayaçların Suyu Olan Hassasiyeti  
d) Ortalama Tabaka Kalınlığı  
e) Süreksizlik Devamlılığı  
f) RQD  
g) Tavan Litolojisi  
h) Süreksizlik Pürüzlülüğü  
i) Su Gelini  
j) Süreksizlik Dolgusu  
k) Süreksizlik Bozunması  
l) Damar Kalınlığı  
m) Damar Eğimi  
n) Tahkimat Tasarımı  
o) Yalancı Tavan Kalınlığı  
p) Zaman Etkisi

Şekil 4 Tavan ve göçebirlik sınıflamalarında kullanılan değişkenlerin dağılımı ve genel değerlendirilmesi.

veya tavan tabakalarının kendiliğinden dökülmesi şeklinde gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu sebepten tavan tabakalaşmasının arazide detaylı bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir.

Geliştirilen göçebilirlik sınıflamasında yer alan bir diğer değişirge ise tavan dayanımıdır. Sınıflama sisteminde tavan dayanımı kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ile ifade edilmektedir. Burada ifade edilmesi gereken önemli bir husus tavan tabakalarının basınç kuvvetleri etkisi altında değil, çekme kuvvetleri etkisi altında kırıldığıdır. Ancak tek eksenli basınç dayanımının laboratuvarında kolaylıkla belirlenebilmesi, tek eksenli çekme dayanımı ile oldukça anlamlı ilişkilere sahip olması ve ucuz bir deney olması sebebiyle sınıflama sisteminde tavan tabakalarının tek eksenli çekme dayanımı değil tek eksenli basınç dayanımı kullanılmıştır.

Sınıflama sisteminde yer alan son ana değişirge ise su etkisidir. Suyun kaya malzemesinin dayanımını düşürdüğü ve süreksizlik yüzeylerini ayrıştırdığı bilinmektedir. Ayak arkasının göçebilirliğinde suyun etkisi ise tavan su gelirinin fazla olduğu yerlerdeki göçebilirliğin aynı tavanın kuru haline göre daha kolay olacağıdır. Sınıflama sistemindeki suyun etkisi hem arazideki tavan su geliri hem de kaya malzemesinin suya karşı olan hassasiyeti olarak tanımlanmaktadır. Tavan su geliri daha çok gözlemsel incelemelere dayanmaktadır. Kaya malzemesinin suya olan hassasiyeti ise, laboratuvarında suda dağılmaya karşı dayanım deneyleri ile belirlenmektedir. Suda dağılma deneyinde dördüncü çevrime karşılık gelen suya karşı dağılma indeksi değeri ( $I_{d4}$ ) kayacın suya olan hassasiyeti ile ilgili bölümde tanımlanmış ve buna göre puanlandırılmıştır.

Sınıflama sisteminde yukarıda ifade edilen dört ana değişirge ile temel bir göçebilirlik puanı elde edilmektedir. Daha sonra, ayağa ait diğer değişkenlerin (tahkimat tasarımı, ayak eğimi ve üretim derinliği) ilave edilmesi ile düzeltilmiş bir göçebilirlik puanı elde edilmektedir. Sözü edilen düzeltme işlemi, ayak eğimi, üretim derinliği ve tahkimat tasarımı ile ilgili arazi bilgilerine dayanmaktadır. Geliştirilen sınıflama sisteminde ayak eğimi ve üretim derinliği ceza puanı olarak, tahkimat tasarımı ise ceza çarpanı olarak yer almaktadır.

Ayak eğimi arttıkça yerçekimi etkisi azalacağından ayağın göçebilirliği zorlaşmaktadır. Üretim derinliğinin artması ise arazi gerilmelerinin artması anlamına geldiğinden, derinlik arttıkça

ayak arkasının göçmesi kolaylaşacaktır. Tahkimat tasarımı da, ayak arkasının kırılması, üretim verimliliği, iş güvenliği ve işçi sağlığı açısından oldukça önemli bir olgudur. Düzgün olarak kurulmuş bir domuzdamı ayak arkasının kırılması kolaylaştırmakla birlikte, iyi sıkılanmamış ve düzgün kurulmamış bir domuzdamı tavan tabakalarının göçerken kenetlenmesine sebep olmaktadır. Böylece ayağın göçmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca düzgün kurulmamış tahkimat üniteleri, tavan yüklerinin akışını bozmakta ve arın patlamasına kadar gidebilen olumsuz sonuçlara sebep olabilmektedir.

Yukarıda ifade edilen dört ana değişirge ve düzeltme işlemlerinin beraber kullanılmasıyla bir tavan göçebilirlik puanı elde edilir. Önerilen göçebilirlik sınıflaması Çizelge 12 ile, ceza puanları ve ceza çarpanı ise Çizelge 13'te detayları ile verilmiştir. Çizelge 12 ve Çizelge 13'ün kullanılmasında aşağıdaki hususların dikkate alınması gerekmektedir.

- i. Yalancı tavan dayanımı, laboratuvarında kaya malzemelerinin tek eksenli basınç dayanım değerlerine göre belirlenmektedir. Sınıflama sistemine %20 etki eden (en yüksek 20 puan) yalancı tavan dayanımı, kuru veya doymuş şartlarda gerçekleştirilmeli, arazi su geliri durumuna göre kuru veya doymuş tek eksenli basınç dayanımı kullanılmalıdır.
- ii. Yalancı tavanın süreksizlik özellikleri süreksizlik aralığı, devamlılığı, süreksizlik doldu durumu ve süreksizlik yüzeylerinin ayrışma-bozunma özelliklerine göre puanlandırılmalıdır. Sınıflama sistemine, süreksizlik aralığı %10 (en yüksek 10 puan), süreksizlik devamlılığı %10, süreksizlik dolgu durumu %5, süreksizlik pürüzlülüğü %5 ve süreksizlik yüzeylerinin ayrışma-bozunma durumu ise %10 oranında etki etmektedir. Bu özelliklerden süreksizlik aralığı ( $J_s$ ) arazide şerit metre kullanılarak genelde arına dik, mümkün olan yerlerde ise arına paralel olarak yapılmalıdır. Süreksizlik devamlılığı da aynı şekilde şerit metre yardımı ile özellikle arına paralel; arına paralel ölçümlerin alınmadığı yerlerde ise arına dik olarak yapılmalıdır. Süreksizlik dolgu durumu, tavan tabakalarından alınan kaya bloklarının laboratuvarında incelenmesi ile belirlenmelidir. Süreksizlik pürüzlülüğü, pratik olarak bir pergel yardımı ile arazide profilmetreye benzer bir yaklaşım ile belirlenmelidir. Pergelin sivri ucu kaya kütle sine sürtülürken, kalemin ucu kağıda sürek-

sizliklerin profilini çıkartmaktadır. Çıkarılan profil Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen abakta hangi profile uyuyorsa süreksizliklere ait bir süreksizlik pürüzlülük katsayısı (JRC) belirlenmelidir ve buna göre bir süreksizlik pürüzlülük puanı verilmelidir. Süreksizliklerin ayrışma-bozunma durumu ise arazi gözlemlerine veya niceliksel olarak Singh ve Gahrooe (1989) yaklaşımına göre belirlenmelidir.

- iii. Tavan su geliri ayak dibindeki gözlemlere dayanmalıdır ve sınıflama sisteminde %5 (en fazla 5 puan) etkilidir. Kayaçların suya olan hassasiyeti ise laboratuvarında suda dağılma deneyleri ile belirlenmelidir. Suda dağılma deneyinde dördüncü çevrime karşılık gelen değer belirlenerek bir puanlama yapılmalıdır. Suya karşı duyarlık puanı sınıflama sisteminde %5 etkilidir.
- iv. Damar tavan özelliklerinden damar kalınlığı sınıflama sistemine %10, yalancı tavan tabakalaşması ise sisteme %20 oranında etki etmektedir. Damar kalınlığı arazi incelemelerinde her sarma başında yapılmalı ve

kaydedilmelidir ve ortalama damar kalınlığına göre bir puanlama yapılmalıdır. Yalancı tavan tabakalaşma kalınlığı ise, göçmüş bloklar incelenerek ortalama tabakalaşma kalınlığı Nichols'a (2009) göre belirlenmeli ve puanlama buna göre yapılmalıdır.

- v. Ceza puanlarından ayak eğimi ve üretim yeraltı topoğrafı tarafından belirlenmelidir. Belirlenen değerlere göre ceza puanları Çizelge 13'e göre puanlandırılır
- vi. Tahkimat tasarımına ilişkin ceza çarpanı ise arazi gözlem ve incelemelerine dayanmaktadır. Çatal direk ve domuzdamlarında herhangi bir eğilme, iyi sıkılanmamış tahkimat üniteleri, taban kömürü vb. araziye ait durumlar detaylı şekilde not edilmeli ve uygun bir ceza çarpanı seçilmelidir. Tahkimat ünitelerine ait ceza çarpanı sınıflama sistemini en fazla %20 oranında etkilemektedir.
- vii. Yukarıda ifade edilen önemli noktalar ışığında, Çizelge 11 kullanılarak temel bir tavan göçebilirlik puanı (TGP) elde edilir. Daha sonra Çizelge 12'de ifade edilen ceza puanı (CP) ve Ceza Çarpanı (CÇ) gibi düzeltme-

Çizelge 12 Zonguldak Taş Kömürü Havzası uzunayakları geliştirilmiş tavan göçebilirlik sınıflaması.

YALANCI TAVANIN DAYANIMI (% 20)		Tanımlama	Çok Sağlam	Sağlam	Orta Sağlamlıkta	Zayıf	Çok Zayıf
		$\sigma_{ci}$ (MPa)	> 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	< 5
		$I_{s(50)}$ (MPa)	> 4	4 - 2	2 - 1	Tek eksenli basınç dayanımına bakın	
		Puan	20 - 15	15 - 10	10 - 5	5 - 3	3 - 1
YALANCI TAVANIN SÜREKSİZLİK ÖZELLİKLERİ (% 40)	Aralık (% 10)	Tanımlama	Çok Geniş Aralıklı	Geniş Aralıklı	Orta Aralıklı	Yakın Aralıklı	Dar Aralıklı
		Süreksizlik Aralığı (S)	$S > 2$ m	$2 \text{ m} \geq S > 0,6$ m	$0,6 \text{ m} \geq S > 0,2$ m	$0,2 \text{ m} \geq S > 0,06$ m	$S \leq 0,06$ m
	Devamlılık (% 10)	Tanımlama	Çok Kısa	Kısa	Orta	Uzun	Çok Uzun
		Süreksizlik İzi Uzunluğu (L)	$L < 0,3$ m	$0,3 \text{ m} \leq L < 1$ m	$1 \text{ m} \leq L < 3$ m	$3 \text{ m} \leq L < 10$ m	$L \geq 10$ m
	Pürüzlülük (% 5)	Tanımlama	Çok Pürüzlü	Pürüzlü	Az Pürüzlü	Düzlemsel	Kaygan
		JRC (Barton & Choubey, (1977)	20 - 14	14 - 10	10 - 6	6 - 2	2 - 0
	Dolgu (% 5)	Tanımlama	Dolgusuz	Katı Dolgu		Yumuşak Dolgu	
		Puan	5	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
	Bozunma (% 10)	Tanımlama	Bozunmamış (I)	Hafifçe Bozunmuş (II)	Ortada Derecede Bozunmuş (III)	İleri Derecede Bozunmuş (IV)	Tamamen Bozunmuş (V)
		Singh & Gahrooe (1989)	$W_d \leq 1,2$		$1,2 < W_d < 2$		$W_d \geq 2$
SUYUN ETKİSİ (% 10)	Tavandan Su Geliri (% 5)	Tanımlama	Kuru	Nemli	Islak	Damlama	Akma
	Puan	5	Yok	< 10 litre/dak	10 - 25 litre/dak	25 - 125 litre/dak	> 125 litre/dak
Suya Karşı Duyarlık (% 5)	Suda Dağılma Day. ( $I_{sd}$ )	$\geq \% 98$	$\% 98 - 95$	$\% 94 - 90$	$\% 89 - 70$	$\% 70$	
	Tipik Kayaç	Kumtaşı	Silttaşı	Şeyl	Konglomera	Kilitaşı	
DAMAR-TAVAN ÖZELLİKLERİ (% 30)	Kömür Damarı (% 10)	Tanımlama	Çok İnce	İnce	Orta	Kalın	Çok Kalın
	Damar Kalınlığı (H)	< 1 m	$1 \leq H < 2$ m	$2 \leq H < 3$ m	$3 \leq H < 4$ m	$H \geq 4$ m	
Yalancı Tavan Tabakalaşması (% 20)	Tanımlama	Çok Kalın Tabakalı	Kalın Tabakalı	Orta Tabakalı	İnce Tabakalı	Laminallı	
	Tabakalaşma Kalınlığı (Nichols, 2009)	> 100 cm	100 - 30 cm	30 - 10 cm	10 - 1 cm	< 1 cm	
		Puan	20	19 - 15	14 - 10	10 - 5	4 - 1

(\*) Arına paralel konumdaki süreksizlikler için puanın yarısı alınır.

Çizelge 13 Göçebirlik Sınıflaması Ceza Puanları ve Ceza Çarpanı.

1 ) Damar Eğimi Puanlaması	2 ) Üretim Derinliği Puanlaması	3 ) Tahkimatın Kurulma ve Sökülme Çarpanı	Ceza Çarpanı		
Damar Eğimi (°)	Ceza Puanı	Derinlik (m)	Ceza Puanı	Tanımlama (*)	
< 10	-5	< 50	0		
10 - 20	-4	50 - 150	-1	3a	0,8
20 - 30	-3	150 - 250	-2		
30 - 40	-2	250 - 350	-3	3b	0,9
40 - 50	-1	350 - 450	-4		
> 50	0	> 450	-5	3c	1,0

(\*)Tanımlama

3a) Tahkimat doğru kurulmakta ve sökülmemekte

- Taban temizlenmiş ve damın kurulacağı yerde taban kömürü alınmış
- Taban olabildiğince düzeltilmiş
- Damlar uygun şekilde kurulmuş ve sıkılanmış
- Damın her iki yanına da birer adet uygun çatal direk dikilerek tavanın göçmesi kolaylaştırılmış
- Damların sökülmesi esnasında göçük bölgesinde herhangi bir tahkimat elemanı kalmamış

3b) Tahkimatın kurulmasında ve/veya sökülmesinde sorunlar var

- Kalın damarlarda tahkimat doğru kurulmamış ve sıkılanmamış
- Domuzdamının havesinde çatal direkler konulmamış
- Domuzdamı tam anlamıyla sökülememiş ve dam duraylılığını yitirmemiş
- Eğimi yüksek ve kalın damarlarda damın katılığı azalmış
- Taban kömürünün fazlalığı sebebiyle, tahkimat tabana kısmen batmış
- Damlar kurulumdan sıkılaşma takozu veya hidrolik yastık kullanılmamış

3c) Göçükte çatal direk ve domuzdamı bırakılmakta

- Faylı, tavantaşının kısmen değiştiği ve kayma zonlarının olduğu bölgelerde büyük bloklar domuzdamı üzerine oturmuş
- Ayak arkasının kesilmesi çeşitli sebeplerle (hatalı uygulamalar, eksik ekipmanlar vb.) mümkün olmamış
- Göçmekte olan küçük tavan blokları kenetlenmiş ve tahkimat üniteleri tavan blokları tarafından kilitlenmemiş
- Ana tavan yalancı tavan üzerine oturmuş
- Hatalı kurulan domuzdamı tavan yükleri tarafından eğilmiştir



Çizelge 14 Önerilen Tavan Göçebilirliği Puanlaması.

Tavan Sınıfı	Göçebilirlik Puanı	Tavan Göçebilirliği	Göçme Davranışı	Tahmini Ayak Kırılma Mesafesi (m)
I	< 40	Çok Kolay	Kendiliğinden göçme	1 - 1,5
II	40 - 50	Kolay	Küçük bloklı göçme	1,5 - 4
III	50 - 60	Orta	küçük-orta bloklı göçme ve tabaka ayrılmaları şeklinde	4 - 8
IV	60 - 70	Zor	Periyodik kırılma	8 - 13
V	> 70	Çok Zor	Göçme çoğu kez kendiliğinden gerçekleşmez, kontrollü delme-patlatma gerekebilir.	> 13

ler ile düzeltilmiş göçebilirlik puanı (DGB) hesaplanır. Çizelge 12 ve Çizelge 13'ü bir bağıntı şeklinde göstermek gerekirse, aşağıdaki görgül bağıntı kullanılarak düzeltilmiş göçebilirlik puanı hesaplanabilir.

$$D_{GP} = (T_{GB} - C_P) \times C_C \quad (5)$$

Eşitlik 5 ile elde edilen düzeltilmiş göçebilirlik puanı Çizelge 13'te yerine konarak ayağın göçebilirlik durumu ortaya konmaktadır.

Ayrıca elde edilen düzeltilmiş göçebilirlik puanı ile ayak arkasının tahmini kırılma mesafesi, göçme davranışı gibi önemli hususlar hakkında kesirimler Çizelge 14'te yer almaktadır.

## 5. GÖÇEBİLİRLİK SINIFLAMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bölüm 4'te farklı araştırmacılar tarafından önerilen göçebilirlik sınıflamaları ile bu çalışmada önerilen göçebilirlik sınıflaması, Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda yer alan ve Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK)'ya ait 6 adet uzunayağa uygulanmıştır. Bu göçebilirlik durumlarının önerilen sınıflama sistemi ile olan benzerlik ve farklılıklarının ortaya konması, sınıflama sisteminin uygulanabilirliği ve sistemin ilerleyen zaman içindeki gelişimi açısından oldukça önemlidir. Çizelge 15'te bu karşılaştırmaya yer verilmiştir. Çizelge 15'e göre önerilen göçebilirlik sınıflama sistemlerinin diğer sistemler ile çoğunlukla uyum içinde olduğu görülmektedir.

Sınıflama sistemleri arasında önerilen sınıflama sistemi ile önemli ölçüde uyuşan sınıflama sis-

temleri; Mark ve Molinda (2003), Das (2000), Laubscher (1990) ve Hongzhu (1996) yaklaşımlarıdır. Bunun dışında önerilen sınıflama sistemi ile diğer sınıflama sistemleri arasında da genel bir uyum olmakla birlikte farklı yorumlamalar da görülmektedir. Buna en belirgin örnek Üzülmüş 4. Ocak Sulu ayaktır. Üzülmüş 4. Ocak Sulu ayağın göçebilirlik durumu Bilinski ve Konopko (1973) yaklaşımına göre "Zor" göçebilen bir tavan iken, önerilen sınıflama sistemi, Mark ve Molinda (2003), Laubscher (1990), ve Das (2000) sınıflama sistemlerine göre "Kolay" göçebilen bir tavan olarak tanımlanmaktadır. Bu yaklaşımlar arasındaki farklılığın sebebi ise, yaklaşımlarda kullanılan girdi parametrelerinin farklılıklarından ileri gelmektedir (Bkz. Şekil 4).

Sınıflama sistemlerinin karşılaştırılmasında değinilmesi gereken bir diğer husus ise, bu çalışmada kullanılan ve tabaka kontrolünde yaygın olarak atıf alan tavan göçebilirlik sınıflamalarının çoğunlukla duraylı yalancı tavanları daha iyi tanımladığı, buna karşın yarı duraylı ve duraysız yalancı tavanların göçebilirlikleri konusunda farklı sonuçlar verdiği gerçeğidir. Bu tespit ışığında, tavan göçebilirlik sınıflama sistemlerinin geliştirilmesinde duraylı yalancı tavanlardan veri almanın diğer tavan koşullarına göre daha kolay olması, duraylı yalancı tavan hareketlerinin ve göçebilirlik mekanizmalarının diğerlerine göre daha sade ve anlaşılır oluşu bu tip tavanların daha sağlıklı analiz edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Çizelge 15 bu savı doğrusu destekler niteliktedir.

Bu çalışmada önerilen sınıflama sisteminin diğer sınıflama sistemlerinden ayıran en belirgin özellik, tahkimat ünitelerinin kurulma ve sökülme işlemlerinin ilk kez bir sınıflama sisteme dahil edilmesidir. Teknolojinin gelişmesi ile ahşap tah-

Çizelge 15 Göçebilirlik Sınıflamalarının Karşılaştırılması.

İncelenen İşletmeler		Tavan Göçebilirliği Sınıflama Puanları						
Müessese / Kartiye / Damar Adı	Bilinski ve Konopko (1973)	Laubscher (1990)	Mark ve Molinda (2003)	Das (2000)	Hongzhu (1996)	Venkateswarlu et al. (1989)	Singh et al. (1999)	Bu Çalışma (2013)
TTK Üzülmaz / 1. Kartiye / Çay	177	74	74	77	13	88	7710	62
TTK Üzülmaz / 2. Kartiye / Piriç (Silttaşı)	54	46	35	41	4	54	2097	42
TTK Üzülmaz / 2. Kartiye / Piriç (Konglomera)	71	60	48	59	6	65	3191	56
TTK Üzülmaz / 3. Kartiye / Çay Piçi	254	72	77	75	17	86	25192	76
TTK Üzülmaz / 4. Kartiye / Sulu	94	39	34	44	6	54	4293	45
TTK Kozlu / 5. Kartiye / Kurul	37	55	42	46	3	56	2783	46
TTK Karadon (Gelik) / 3. Kartiye / Kurul	166	61	61	58	9	69	5660	62

İncelenen İşletmeler		Tavan Göçebilirlik Durumları						
Müessese / Kartiye / Damar Adı	Bilinski ve Konopko (1973)	Laubscher (1990)	Mark ve Molinda (2003)	Das (2000)	Hongzhu (1996)	Venkateswarlu et al. (1989)	Singh et al. (1999)	Bu Çalışma (2013)
TTK Üzülmaz / 1. Kartiye / Çay	Çok Zor	Zor	Çok Zor	Zor	Çok Zor	Çok Zor	Zor	Zor
TTK Üzülmaz / 2. Kartiye / Piriç (Silttaşı)	Orta	Orta	Kolay	Orta-Kolay	Orta	Orta	Orta	Kolay
TTK Üzülmaz / 2. Kartiye / Piriç (Konglomera)	Zor	Orta	Orta	Orta	Orta	Zor	Orta	Orta
TTK Üzülmaz / 3. Kartiye / Çay Piçi	Çok Zor	Zor	Çok Zor	Zor	Çok Zor	Çok Zor	Çok Zor	Çok Zor
TTK Üzülmaz / 4. Kartiye / Sulu	Zor	Kolay	Çok Kolay	Orta-Kolay	Orta	Orta	Orta	Kolay
TTK Kozlu / 5. Kartiye / Kurul	Orta	Orta	Kolay	Orta-Kolay	Kolay	Orta	Orta	Kolay
TTK Karadon (Gelik) / 3. Kartiye / Kurul	Çok Zor	Zor	Zor	Orta	Zor	Zor	Zor	Zor

kimat ile çalışan ayakların giderek azaldığı günümüzde, üretime jeolojik sorunlar ve özel hava koşulları sebepleriyle zorunlu olarak ahşap tahkimat ile devam edilen Zonguldak Taşkömürü Havzası uzunayaklarının göçebilirliği konusunda yapılmış bu çalışma ile, yarı duraylı ve duraysız olarak tanımlanan yalancı tavanların (Özellikle Üzülmaz 4. Kartiye Sulu Ayak ve Üzülmaz 2. Kartiye Piriç Ayağın) göçebilirlik durumlarının diğer sınıflama sistemlerine göre daha iyi açıklayabildiği gerek sahada çalışan mühendislerin geri bildirimleri gerekse Çizelge 15'teki değerlerin karşılaştırılması ile ortaya konmuştur.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, uzunayak madenciliğinde ayak arkasının göçebilirliği konusunda yer alan önemli tanımlamalar (ayak arkasının kırılmasında etkili olan değişirgeler, literatürde yer alan tavan ve göçebilirlik sınıflandırmaları vb.) özetlenmiş, arazi çalışmaları ile ayakların göçebilirlik durumları yerinde gözlemlenmiştir. Arazi ve laboratuvar çalışmaları ile tavan kayaçlarının fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Daha önce yer alan tavan göçebilirliği sınıflamaları ışığında Zonguldak Taş Kömürü Havzası uzuna-

yakları için bir tavan göçebilirliği sınıflaması önerilmiştir. Önerilen sınıflama sistemi daha önceki sınıflama sistemleri ile karşılaştırılmış ve sınıflama sisteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilebilecek önemli sonuçlar ve öneriler ise aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- i. Arazi ve laboratuvar çalışmaları ışığında bir tavan göçebilirlik sınıflaması geliştirilmiş ve geliştirilen göçebilirlik sınıflaması diğer sınıflama sistemleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak göçebilirlik sınıflamasının incelenen ayaklara başarı ile uygulandığı görülmüştür.
- ii. Önerilen göçebilirlik sınıflaması, ayağın üretime başladıktan sonraki göçebilirliğine ilişkin arazi gözlem ve incelemelerine dayanmaktadır. Bu sebepten ayağın üretime başladığı andaki ilk göçebilirliği için önerilen göçebilirlik sınıflamasının kullanılmaması önemle hatırlatılmalıdır.
- iii. Bu çalışma ile ortaya konulan göçebilirlik sınıflama sisteminin Zonguldak Havzası için olan önemi; havzada konu ile ilgili yapılmış ilk çalışma olması ve önerilen göçebilirlik sınıflamasında diğer sınıflama sisteminde olmayan ancak havzada etkili olan deşirtirgelerin (üretim derinliği, damar eğimi ve tahkimat tasarımı) sınıflama sisteminde yer alıyor olması ile açıklanabilir.
- iv. Önerilen sınıflama sisteminin diğer sınıflama sistemlerinden olan üstünlüğü, yarı-duraylı ve duraysız yalancı tavanların göçebilirlik durumlarının önerilen sınıflama sistemi ile daha iyi ifade edilmesidir. Buna karşın sınıflama sisteminin eksik yönleri de vardır. Ayak arkasının göçmemesi ile ayakiçi tahkimat ünitelerinin yüklenmesi arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Ayrıca ayna kesmesi ile ilgili risklerin önerilen sınıflama sistemine dahil edilmesi gerekmektedir. Zira zor göçen tavan koşullarında ayna kesmesi ciddi bir risk oluşturmaktadır.
- v. Sonuç olarak önerilen sınıflama sisteminin sadece 6 adet uzunayaktaki gözlem ve incelemelere dayalı olduğu, her sınıflama sisteminde olduğu gibi önerilen sınıflama sisteminin çok sayıda ayağa uygulanarak sınıflama sisteminin geliştirilmesinin kaçınılmaz olduğu bir kez daha hatırlatılmalıdır.

## TEŞEKKÜR

Yapılan çalışmalarda öneri ve yardımları için Bülent Ecevit Üniversitesi Öğretim Üyeleri Sayın Prof. Dr. Hasan GERÇEK, Prof. Dr. Tuğrul ÜNLÜ, Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN ve Selçuk Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. İhsan ÖZKAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

## KAYNAKLAR

- Barton N and Choubey V (1977) The Shear Strength of Rock and Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Abst., 13: 255-279.
- Bikermann D J and Mahtab M A (1986) Use and Abuse of RQD in Underground Mine Design, Proc. of Min. Latin America Conf., Santiago, Chile, London, 51-56.
- Bilinski A and Konopko W (1973) Criteria of the Selection of Individual and mechanized Support Schemes for Longwall Workings (in Polish), Przeglad 6: 241-244.
- Bilinski A and Konopko W (1974) A Method of Choice of Support in Longwall Workings Mined with Caving, Central Min. Inst.,
- Birön C ve Arıoğlu E (1999) Madenlerde Tahkimat İşleri ve Tasarımı, Birsan Yayınevi, İstanbul, 361.
- Brauner G (1973) Subsidence due to underground mining, pt. 1: U.S. Bureau of Mines, Information Circular 8571, IC 8572, 53.
- Das S K (2000) Observations and Classification of Roof Strata Behaviour over Longwall Coal Mining Panels in India, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 37 : 585-597. Annual Report, Katowice.
- Diederichs M S and Kaiser P K (1999) Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 36 : 69-96.
- Ghose A K (1976) Design of Longwall Systems for Future Longwall Faces, Journal of Mines Metals and Fuels of India, Special Number on Mine Support.
- Hongzhu Z (1996) Ground Pressure Characteristic and Selection of Hydraulic Supports in Fully Mechanized Longwall Face in China, Second Nat. Conf. on Ground Control in Mining, 57-78.
- ISRM (1981) ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring, ed. E. T. Brown, Pergamon Press, London, 211.
- Jacobi O (1981) Praxis der Gebirgsbeherrschung, 2. Auflage, Essen, 576.
- Jeremic M L (1985) Strata Mechanics in Coal Mining, A.A. Balkema, 564.

Laubscher D H (1990) A Geomechanics Classification System for the Rating of Rock Mass in Mine Design, J. South Afr. Inst. Min. Metall. 90: 257-273.

Mark C and Molinda G M (2003) The Coal Mine Roof Rating in Mining Engineering Practice, Proc. of the Fourth Under. Coal Operators Conf., ed. Aziz N, Kininmonth B, Carlton, Victoria, Australia: Australian Institute of Mining And Metallurgy.

Mark C, Pakalnis R T and Tuchman R J (2007) Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining, Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh Research Laboratory, 162.

Nichols G (2009) Sedimentology and Stratigraphy, John Wiley&Sons, 419.

Singh R and Singh T N (1999) Investigation into the Behaviour of A Support System and Roof During Sublevel Caving of A Thick Coal Seam, Geotech. And Geol. Eng., 17: 21-35.

Singh R N and Gahrooe D R (1989) Application of Rock Mass Weakening Coefficient for Stability Assessment of Slopes in Heavily Jointed Rock Mass, Int. J. Surf. Min., Reclam. and Envir., 3: 207-219.

Siska L (1972) Problems Relating to Coal Extraction in Seams Containing Strong Sandstones in The Overlying Strata, Int. Strata Control Conf., London.

TTK (2013) Türkiye Taşkömürü Kurumu Plan Büroları arşivleri (Üzülmez, Kozlu ve Gelik Müesseseleri).

Unrug K F (1983) Longwall Support Requirements, Journal of Mines Metal and Fuels of India, Special Number on Updates on Longwall Mining-Evolving Trends.

Venkateswarlu V, Ghose A K and Raju N M (1989) Rock Mass Classification for Design of Roof Supports – A Statistical Evaluation Of Parameters, Min. Sci. And Tech., 97-107.

Whittaker B N and Breed C D (1977) The Influence of Surface Geology on the Character of Mining Subsidence, Assoc. Geotech. 459-468, Milan.

Whittaker B N and Jeremic M L (1979) Longwall Mining Potential of Plains, Region of Coal Deposits in Western Canada Colliery, Guar. Coal Int., 31-39

Whittaker B N and Reddish D J (1989) Subsidence : Occurrence, Prediction and Control, Amsterdam, 528.

## BORİK ASİT LIÇI İLE TOSYA LİNYİT KÖMÜRÜNDE KÜL ve KÜKÜRT GİDERİMİ

### *Ash and Sulfur Removal from Tosya Lignite Coal with Boric Acid Leaching*

Hasan HACİFAZLIOĞLU\*

Dilara UÇKAN\*\*

#### ÖZET

Bir bor minerali olan ve ülkemizde bolca bulunan kolemanit, borik asit üretiminde kullanılan ana hammaddedir. Borik asit, genellikle antiseptik, böcek ilacı ve koku gidericilerde kullanılan beyaz kristal renkli, suda çözünen zayıf bir inorganik asit tipidir. Kömürlerin içerisinde bulunan kül ve kükürdün liç yöntemi ile giderilmesinde genellikle HCL, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HF ve HNO<sub>3</sub> gibi asitler tercih edilmekte ancak bu asitlerin çok kuvvetli olması nedeni ile kullanılmasında çevresel yönden önemli sakıncalar ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, ekonomik olması koşulu ile zayıf asitlerle liç kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu çalışma kapsamında, ülkemizde üretimi yapılan borik asit ile Kastamonu-Tosya linyit kömüründen kül ve kükürdün giderilmesi için liç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca borik asit liçinin verimliliğinin saptanabilmesi için HF, HCL ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile liç yapılarak kül ve kükürt giderimleri karşılaştırılmıştır. Borik asit liçinin, kül ve kükürt gideriminde en az sülfürik asit liçi kadar verimli olduğu ancak HF liçine göre daha düşük verim sağladığı görülmüştür. En uygun koşulda, borik asit liçi ile kömürdeki kül değeri %14.62'den %8.60'a, kükürt değeri ise %8.77'den %5.95'e düşmüştür. HF liçi ise, kömürdeki kül değerini %3.02'ye kükürt değerini %4.27'ye düşürmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Kömür, Kül Giderme, Kükürt Giderme, Borik Asit

#### ABSTRACT

A kind of boron mineral abounding in our country, colemanite is the primary material used in the production of boric acid. Boric acid is a kind of weak inorganic acid which has a crystal white colour and dissolves in water and is used in germicides, insecticides and deodorizers. In the removal of ash and sulfur with leaching method, acids like HCL, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HF and HNO<sub>3</sub> are generally preferred. Yet, there are some important environmental inconveniences as they are extremely strong. In this framework, leaching with weak acids is inevitable on the condition that they are cheap. In the scope of this research, leaching experiments were conducted with boric acid on the removal of ash and sulfur from Kastamonu-Tosya lignite coal. Apart from that, to determine the efficiency of the leaching with boric acid, a leaching experiment was conducted with HF, HCL, and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ash and sulfur removals were compared. It was observed that boric acid leaching is at least as efficient as sulfuric acid for removal of ash and sulfur whilst it is less efficient than HF leaching. In the optimum conditions, boric acid leaching, ash value in the coal was decreased from 14.62 % to 8.60% and the sulfur in the coal from 8.77% to 5.95%. When it comes to HF leaching, it decreased the ash value in the coal to 3.02% and sulfur value to 4.27%.

**Keywords:** Coal, Ash Removal, Sulfur Removal, Boric Acid

\* Yrd.Doç.Dr. İstanbul Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., İSTANBUL, hasanh@istanbul.edu.tr

\*\* Maden Müh., Süper Enerji Madencilik, Aliağa Tesisi, İZMİR

## 1. GİRİŞ

Kömürde bulunan kül ve kükürt istenmeyen sızlıkların en başında gelir. Kül, kömürün ısı değerini düşürür, nakliye giderlerini artırır. Kazanlarda cüruf oluşumuna ve fazla miktarda partikül salınımına neden olur. Ayrıca, koklaştırma, gazlaştırma ve sıvılaştırma gibi işlemlerde sorunlar oluşturur. Kömürlerin kül ve kükürt içeriği, teknolojik uygulamalarda, yüksek verim ve kaliteli ürün eldesi açısından önemli bir parametredir. Yakma, briketleme, koklaştırma, gazlaştırma, düşük sıcaklık karbonizasyonu ve sıvılaştırma gibi kömür değerlendirme işlemlerinin öngördüğü kül ve kükürt sınırlamaları farklıdır. Örneğin, koklaştırılacak kömürün kül içeriği %10'un altında, kükürt içeriği ise %2'nin altında olmalıdır.

Yüksek kükürtlü kömürlerin yakılması sonucunda atmosferdeki kükürtdioksit ( $SO_2$ ) emisyonları artmakta ve asit yağmurlarına neden olup, bu durumdan çevre ve insan sağlığı ciddi şekilde etkilenmektedir. Kükürt, metalurjide kullanılan kokun kalitesini de düşürmektedir. Ayrıca, kükürtlü kömürlerin yakılmasıyla sülfürik asit oluşmakta ve yakma sistemlerinde korozyon meydana gelmektedir. Kükürt bazı kömürlerde az, bazılarında ise çok bulunur. Genel olarak ülkemizdeki linyitler %0.3 - 6 aralığında, taş kömürleri ise %0.6 - 3 aralığında kükürt içermektedir. Ancak, kükürt içeriği %6'ın üzerinde olan kömürlerde mevcuttur (Ateşok, 2004; Özdoğan ve Ünver, 1998). Kömürdeki kükürt; organik ve inorganik olmak üzere başlıca iki formda bulunmaktadır. İnorganik kükürt kömürde; "sülfat", "piritik" ve "elementer kükürt" olarak bulunur. Organik kükürt, kömürün organik materyalinin bir parçasıdır. Başka bir deyişle hidrokarbon yapıya bağlı olarak bulunur. Bu nedenle, kömürden fiziksel yöntemlerle (ağır ortam, spiral, masa, flotasyon, aglomerasyon vb.) uzaklaştırılması mümkün değildir. Organik kükürt yalnızca kimyasal ve biyolojik yöntemlerle giderilebilmektedir (Jorjani et al., 2004; Bilir, 1993). Sülfat kükürdü, kömürde toplam kükürdün çok az bir kısmını oluşturur. Jips ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) halinde bulunduğu gibi, kömürün hava ile uzun süre teması sonucu  $FeSO_4$  olarak da bulunabilir. Sülfat kükürdü (özellikle  $FeSO_4$  ve  $CuSO_4$  gibi) suda kolay çözünmediğinden fiziksel yöntemlerle kömürden uzaklaştırılması oldukça kolaydır. Jips suda çözünmeyen bir bileşiktir, ancak yanma işleminde kolay bozulmadığı için hava kirliliği açısından önemli bir problem teşkil etmektedir (Kawatra and Eisele, 1997; Yaman vd., 1998; Demirbaş, 2002; Abdollahy et al., 2006).

Elementer kükürt ise kömür içerisindeki oranının oldukça düşük (<%0,2) olması nedeni ile genellikle zenginleştirme işlemlerinde ihmal edilmektedir (Yıldız, 2007).

Kömürün inorganik kısmını oluşturan kül, "bünye külü" ve "serbest kül" olarak başlıca iki tiptedir. Bünye külü kömürdeki toplam külün %2-3'ünü oluşturur ve kaynağı kömürü oluşturan bitkilerden gelen inorganik maddelerdir. Bünye külü kömür içinde mikroskobik parçacıklar halinde bulunduğu için sadece kimyasal ve fiziko-kimyasal yöntemlerle giderilebilir. Serbest kül ise, üretim esnasında ya da kömürün oluşumu sırasında kömüre karışan kil, şist, kumtaşı, kireçtaşı gibi inorganik maddelerdir. Serbest kül çoğu zaman jig ve ağır ortam ayırıcıları gibi gravite yöntemleri ile kolaylıkla giderilebilmektedir. İnce kömürlerden (-0.5mm) külün giderilmesinde ise spiraller veya flotasyon makineleri tercih edilmektedir. Falkon, Knelson ve Kelsey jigi gibi ileri teknoloji gravite ayırıcıları kömürdeki kül ve kükürdü uzaklaştırmada etkili olsa bile, gerek kurulum maliyeti gerek işletim zorluğu bakımından ülkemizde kullanımı yaygınlaşmamıştır. Bitümlü ince kömürlerin temizlenmesinde ise, köpük flotasyonu en yaygın kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Klasik flotasyon tekniğinde, kükürdün hidrofobik olması nedeni ile kömürle birlikte yüzmesi engellenememektedir. Ancak, gelişmiş flotasyon teknikleri yalnızca piritik ve sülfat kükürdünü belli oranda giderebilmektedir (Lai, 2002; Li et al., 2003; Honaker ve Das, 2004; Hacifazlıoğlu, 2009).

Günümüzde yaygın olarak kullanılan, yoğunluğa ve yüzey özelliğine göre yapılan zenginleştirme işlemlerinde kül belli ölçüde uzaklaştırılabilmekte, ancak kükürt içeriğinde önemli bir düşüş sağlanamamaktadır (Tosun, 1994). Başka bir deyişle, kömür türüne bağlı olarak, kül giderimi önemli ölçüde sağlanabilmesine rağmen, kükürt giderimi genellikle sınırlı kalmaktadır. Fiziksel yöntemlerin kükürt gidermede başarısız oluşu diğer alternatif yöntemleri önemli hale getirmektedir. Biyolojik yöntemler kömürlerin kükürtsüzleştirilmesinde etkin olarak kullanılabilmesine rağmen, bu yöntemler daha hassas bakteriyel ortamların kullanımını gerektirmektedir. Bu nedenle bakteriyel yöntemler ile kömürlerin kükürtsüzleştirilmesi için laboratuvar ölçekli, uzun süreli araştırmalardan pilot ve tesis ölçeğine getirilmesi pratik ve ekonomik olmamıştır (Tosun, 1995; Tosun 1997; Sönmez, 2000). Bu bakımdan kükürt gidermede en etkili ve uygulanabilir yöntem

olarak "kimyasal temizleme" yani "liç" işlemi görülmektedir. Kimyasal kükürt giderme yöntemleri, kömürün kükürt içeriği ile seçimli olarak tepkimeye girebilme özelliğine sahip olan kimyasal maddelerin kullanıldığı yöntemlerdir. Kömürlerin kimyasal olarak temizlenmesi, kül yapıcı maddelerin ve kükürdün seçimli olarak çözümlenmesi sonucu gerçekleştirilmektedir (Tosun, 1997). Başka bir deyişle, kömürdeki organik ve inorganik kükürt sıvı içerisinde çözülebilir hale getirilmektedir. Son yüzyılda, kimyasal temizleme çalışmaları; kükürt içeriğinin düşürülmesi, kül yapıcı mineraller maddelerin azaltılması ve süper temiz kömür üretimi için tercih edilmektedir. Günümüzde kömürün mineral madde içeriğinin azaltılmasında yaygın olarak hidroflorik asit (HF), nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) ve sodyum hidroksit (NaOH) liçi kullanılmaktadır. Asit liçinde kömürlerin külü yüksek oranlarda giderilebilmesine rağmen kömürlerin ancak sülfat ve piritik kükürdü önemli ölçüde giderilebilmektedir. Araştırmacıların uyguladığı bir asit liçi işleminde piritik kükürdün tamamının ve toplam kükürdün ise maksimum %80'inin çözünebildiği belirlenmiştir (Meyers, 1973; Tosun, 1997). 1980'li yıllarda geliştirilmiş olan, erimiş kostik liç (MCL) prosesinde ise, kömür yatay döner fırın içerisinde 350-400 °C civarında erimiş kostik soda (KOH+NaOH karışımı) ile muamele edilmekte ve bu yolla mineral madde ve kükürtler suda veya asitte çözünebilir bileşikler haline dönüştürülmektedir. Bu yolla %4 kükürt, %11 kül içeren bir kömürden %0.4 kükürt ve %0.65 kül içeriğinde süper temiz kömürler elde edilebilmektedir (Toroğlu vd., 2004).

Liç öncesinde kömürün mikrodalga ile muamelesi yeni bir yöntem olup, birçok araştırmacı tarafından test edilmiş ve mikrodalga işleminin kükürt giderimi üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Örneğin, %5.3 kükürlü Çayırhan linyiti ile yapılan bir çalışmada, kömür önce 1330 W mikrodalga enerjisi ile ısıtılmış ve takiben HCl/HF liçi uygulanarak kükürt içeriği %2,5'in altına düşürülmüştür. Oysa yalnızca liç uygulanması ile temiz kömürdeki kükürt içeriği %3,6'ya kadar düşürülebilmektedir (Elsamak, 1999; Elsamak vd., 2003). Jorjani vd., (2004) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise Tabas (İran) kömürünün mikrodalga ısıtma ve peroksiasetik asit ile liçi denenmiştir. Mikrodalga fırında 1000 W güç ve 110 saniye süre ile yapılan denemelerde en yüksek kükürt giderimi %33,21 piritik kükürtte, % 3,62 ile organik kükürtte ve % 17,59 ile toplam kükürtte gerçekleşmiştir. Liç zamanı ve sıcaklığın etkisi üzerine yapılan çalışmalarda ise liç süresi

ve sıcaklık artışının kükürt giderimini arttırdığı görülmüştür. Eker (2007) ise, klasik ısıtmalı ve mikrodalga ısıtmalı ortamda İskilip kömürünü beklendikten sonra, Trona çözültüsü ile liç işlemine tabi tutmuştur. Klasik ısıtmalı ortamda yapılan liç ile söz konusu kömürün piritik kükürt içeriği %31, toplam kükürt içeriği %38 oranında azalmış iken, mikrodalga ısıtmalı ortamda yapılan liç deneyi sonucunda piritik kükürt %38, toplam kükürt ise %32 oranında azalmıştır. Mikrodalga ısıtmasının yalnızca piritik kükürt giderimi üzerinde etkili olduğunu belirtmiştir. Başka bir çalışmada ise, erimiş kostiklerin (NaOH ve KOH gibi) mikrodalga ışınımını etkin bir şekilde adsorbladığı, kömür/irit fazının ayırıcı ısıtmasını hızlandırdığı görülmüştür. Bunun özellikle normal şartlarda az ısıtma oluşturan düşük pirit içeriği kömürler için geçerli olduğu belirtilmiş, düşük güç seviyelerinde (500 W) 2,45 GHz frekansta 60 saniyelik bir sürede gerçekleştirilen çalışmada toplam kükürt içeriğinde %70'lere varan azalmalar elde edilmiştir (Rowson ve Rice, 1990; Hayashi, 1990; Toraman ve Depçi, 2007). Ayrıca, pek çok araştırmacı mikrodalga enerjisini kömürden kükürdün giderilmesi için bir "ön-işlem" olarak kullanmışlardır. Örneğin Uslu ve Atalay (2003) Aşkale linyitinin piritik kükürt içeriğini, mikrodalga ön işlemlerle manyetik ayırıcıda %55.11 oranında azaltmışlardır.

Literatürde kömürden kül ve kükürdün liç yöntemi ile giderildiği pek çok çalışmada yukarıda isimleri anılan inorganik asitler kullanılmaktadır. Organik ve zayıf asitlerle kül ve kükürt giderimi üzerine çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, zayıf bir asit olan ve ülkemizde kolemanitten üretilen borik asit ile kömürden kül ve kükürt giderimi için liç deneyleri yapılmış ve diğer inorganik asitlerle performansı karşılaştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Kömür Örneğine Ait Özellikler

Deneylede kullanılan kömür numunesi Kastamonu ili, Tosya ilçesinde faaliyet gösteren özel bir şirkete ait yer altı linyit işletmesinden alınmıştır. İşletmede numune -5mm'nin altına kırıldıktan sonra kapalı kaplarla İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarına getirilmiştir. Söz konusu numunenin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Buna göre linyit kömürü örneği; %14.62 kül içeren, düşük küllü ve %8.77 kükürt içeriğine sahip yüksek kükürlü bir kömürdür.

Çizelge 1. Numunenin Kimyasal Analiz Sonuçları

Analiz	Kuru Kömürde %
Kül (%)	14.62
Uçucu madde (%)	36.85
Sabit karbon (%)	48.53
Toplam kükürt (%)	8.77
Üst ısı değeri (kcal/kg)	6200

### 2.3. Deneylerde İzlenen Yöntem

Yukarıda kısa kimyasal analiz sonuçları verilen kurutulmuş kömür numunesi, çubuklu değirmende kademeli olarak 25 dakika öğütülerek, tamamı 106 mikronun altına indirilmiştir. Liç deneylerinde kullanılan numune -106 mikron tane boyutundadır. Liç reaktifi olarak analitik saflıkta sırasıyla katı formda (toz) borik asit ( $H_3BO_3$ ), hidroklorik asit (HCL), sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) ve Hidroflorik asit (HF); 125, 250, 500 ve 750 kg/t mertebelerinde kullanılmıştır. Bu asitlerin liç çözeltisindeki konsantrasyon değerleri sırasıyla %2.45, %4.76, %9.09 ve %13.04'tür. Pülpte katı (kömür) oranı %20 olarak belirlenen deneylerde, farklı sıcaklıklarda (20, 40, 60 ve 80 °C) ve farklı liç sürelerinde (60, 120, 240 ve 360 dk) her bir asit tipi ile ayrı deneyler yürütülmüştür. Liç deneyleri, farklı sıcaklık değerlerinde çalışabilen çalkalamalı su banyosu içerisine yerleştirilen 250cc'lik erlenler içerisine su, kömür ve reaktif madde ilave edilerek, 250 rpm çalkalama hızında yapılmıştır. Çalkalama sonrasında elde edilen liç çözeltisi filtre edilerek kurutulduktan sonra kül ve kükürt analizine tabi tutulmuştur. Kül analizi Muffle fırın içerisine yerleştirilen porselen krozleler ile gravimetrik yöntemle ASTM D5152'ye göre yapılmıştır. Kükürt analizleri ise İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde bulunan LECO cihazında ASTM D2013'e göre yapılmıştır. Kül ve kükürt giderim verimlerinin hesaplanması için aşağıdaki eşitliklerden faydalanılmıştır:

Beslenen kömürün külü (%) =  $A_p$ , Ürünün külü (%) =  $A_c$  ise;

Kül Giderimi (%) =  $[A_p - A_c] * 100 / (A_p)$  olarak,

Beslenen kömürün kükürdü (%) =  $S_p$ , Ürünün kükürdü (%) =  $S_c$  ise;

Kükürt Giderimi (%) =  $[S_p - S_c] * 100 / (S_p)$  eşitliği ile hesaplanmıştır.

## 3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

### 3.1 Reaktif Tipi ve Miktarının Kül ve Kükürt Giderimine Etkisi

En uygun reaktif tipi ve miktarının araştırıldığı deneylerde, sırası ile borik asit, hidroklorik asit, sülfürik asit ve hidroflorik asit ile farklı reaktif konsantrasyonlarında ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Liç sıcaklığı 60 °C, liç süresi 120 dakika seçilerek, sırası ile 125, 250, 500 ve 750 kg/t mertebelerinde reaktif ilave edilerek deneyler yürütülmüştür. Deneylerden elde edilen ürünlerin kül ve kükürt içerikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 1 ve Şekil 2'de kül ve kükürt giderimleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Çizelge 2'deki verilerden görülebileceği üzere, en yüksek kül giderimi HF ile, 500 kg/t reaktif miktarında elde edilmiştir. HF reaktifi ile kömürdeki kül değeri %14.62'den %5.43'e düşmüştür. Borik asit ile yapılan liç deneylerinde ise üründeki en düşük kül içeriği %12.10 bulunmuştur. HCL ve  $H_2SO_4$  için üründeki en düşük kül değerleri sırasıyla %10.67 ve %12.15'dir. Borik asit miktarının 500 kg/t'dan 750 kg/t'a çıkarılması durumunda ürünün külü besleme külünden daha yüksek bulunmuştur. Bunun muhtemel nedeni 60 °C'de toz halde bulunan borik asidin su içerisinde yeterince çözünmemiş olmasıdır. Böyle bir durumda ya reaktif konsantrasyonu azaltılmalı ya da sıcaklık artırılmalıdır. Çizelge 2'deki kükürt değerleri incelendiğinde yine en düşük kükürtlü ürün (%5.20) HF asidi ile elde edilmiştir. Borik asit, kükürt değerini %8.77'den %6.16'ya düşürmüştür. Diğer asit tipleri ise üründeki kükürt içeriği bakımından borik asit ile yaklaşık olarak benzer sonuçlar vermiştir.

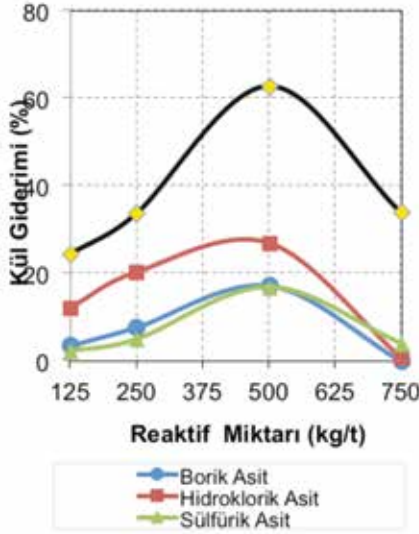
### 3.2 Liç Sıcaklığının Kül ve Kükürt Giderimine Etkisi

Bir önceki deneyden de görülebileceği gibi her bir reaktif tipi için optimum konsantrasyon değeri 500 kg/t'dur. Daha yüksek konsantrasyonlarda verim çok fazla değişmemekle birlikte bazı durumlarda verim düşmektedir. Reaktif sarfiyatı da göz önüne alınarak optimum reaktif ilavesi 500 kg/t olarak belirlenmiştir. Optimum reaktif miktarında 20, 40, 60 ve 80 °C'de 120 dakikalık deneyler yapılarak liç sıcaklığının kül ve kükürt giderimine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, farklı sıcaklıklardaki saf su ile reaktifsiz deneyler yapılmış ve kül-kükürt gideriminde sıcak suyun etkinliği araştırılmıştır. Liç sıcaklığına bağlı olarak elde edilen ürünlerin kül-kükürt değerleri Çizelge 3'te

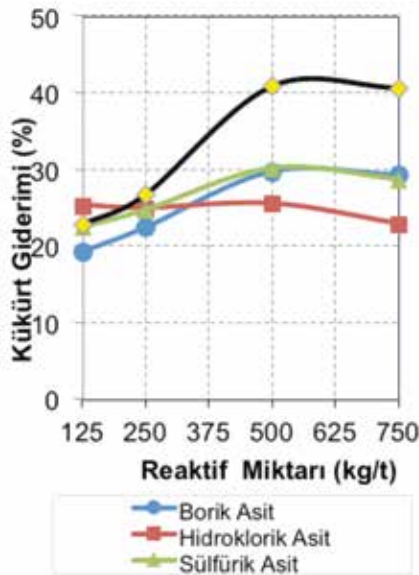


verilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4'te ise kül ve kükürt giderme verimleri gösterilmiştir.

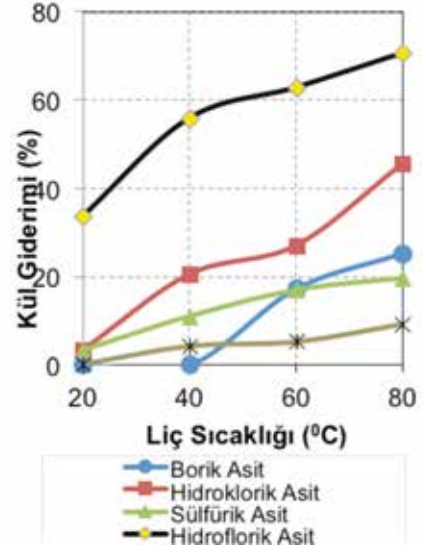
Çizelge 3'deki verilerden görülebileceği üzere, liç sıcaklığı arttıkça elde edilen ürünlerin kül ve kükürt içerikleri azalmıştır. Sadece su ile (reaktifsiz) yapılan deneylerde sıcaklık arttıkça kül %13.27'ye kadar, kükürt %6.52'ye kadar düşmüştür. Bu sonuçlara göre sıcak su tek başına Tosya kömürünün külünde %10'a, kükürdünde %25'e varan oranlarda iyileşme sağlayabilmektedir. En yüksek sıcaklık değerinde (80 °C) en iyi sonucu veren HF asidi ile %4.29 kül ve %5.02 kükürt içeren kömür elde edilmiştir. Borik asit ise kömürün külünü 80 °C'de %10.92'ye, kükürdünü %6.10'a düşürmüştür.



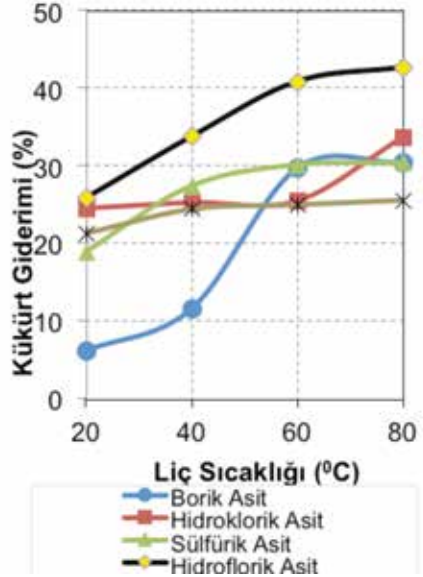
Şekil 1. Reaktif miktarının kül giderimine etkisi



Şekil 2. Reaktif miktarının kükürt giderimine etkisi



Şekil 3. Liç sıcaklığının kül giderimine etkisi



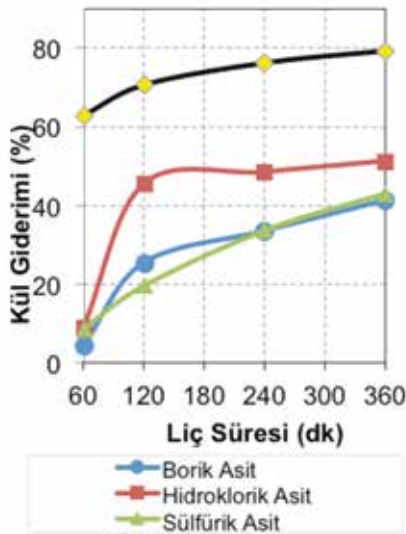
Şekil 4. Liç sıcaklığının kükürt giderimine etkisi

### 3.3 Liç Süresinin Kül ve Kükürt Giderimine Etkisi

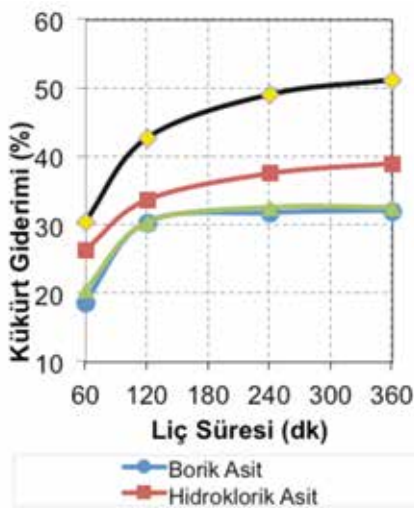
Liç süresinin kül ve kükürt giderimine etkisini araştırmak amacıyla her bir reaktif tipi ile 500 kg/t reaktif miktarında 80 °C'de sırasıyla 60, 120, 240 ve 360 dakika sürelerde ayrı ayrı liç deneyleri yapılmıştır. Liç süresine bağlı olarak elde edilen ürünlerin kül-kükürt değerleri Çizelge 4'te verilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6'da ise kül ve kükürt giderme verimleri gösterilmiştir.

Çizelge 4'den görülebileceği gibi, liç süresi arttıkça ürünün kül içeriği azalmıştır. Optimum koşullarda ve liç süresinin 360 dk olması duru-

munda, Borik asit,  $H_2SO_4$ , HCL, ve HF reaktifleri ile sırasıyla %8.6, %8.32, %7.12 ve %3.02 küllü ürünler elde edilmiştir. Ürünlerdeki kükürt değerleri ise her bir asit tipi için sırasıyla %5.95, %5.90, %5.34 ve %4.27 olarak bulunmuştur. Buna göre, kül ve kükürdü gidermede en güçlü reaktif HF asidi olarak görünmektedir. HF asidi ile kül %80'e varan oranlarda giderilmiştir. Borik asit ise kül gideriminde ancak %41'lik bir verim sağlayabilmiştir. HCL ve  $H_2SO_4$ 'ün kül giderme verimleri ise %40-50 aralığında değişmektedir. HF reaktifinin kükürt giderme verimi %51.31 iken, borik asidin kükürt giderme verimi %32.16'dır. Kükürt gideriminde sülfürik asit, borik asit ile hemen hemen benzer sonuçlar vermişken hidroklorik asit ile kükürt giderimi %39.11 bulunmuştur.



Şekil 5. Liç süresinin kül giderimine etkisi



Şekil 6. Liç süresinin kükürt giderimine etkisi

### 3.4 Bir Reaktif Olarak Borik Asidin Kül ve Kükürt Gideriminde Etkinliği

Literatürde zayıf bir asit olan borik asit ile kömürden kül ve kükürdün giderilmesi ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında, kül ve kükürt gideriminde borik asit bir reaktif olarak kullanılmıştır. Yapılan borik asit çözündürme çalışmalarında, özellikle düşük sıcaklıklarda (20 ve 40 °C) ürün kül değerleri besleme kül değerlerinden daha yüksek bulunmuştur. Bunun nedeni, düşük sıcaklıklarda borik asidin yeterince çözünmemesi ve filtrasyon esnasında filtre üzerinde kömürle birlikte kalarak içeriğindeki bor bileşiklerinden dolayı kül oluşturmuş olmasıdır. Saf su içerisine ilave edilen 750 kg/t mertebesindeki (%13.04 konsantrasyon değerindeki) borik asit ile 20, 40, 60 ve 80 °C'de yapılmış olan borik asit çözündürme deneyleri sonucunda, borik asidin özellikle 20 ve 40 °C'de çok az çözündüğü görülmüştür. 60 °C sıcaklıkta borik asidin yaklaşık %90'ı çözünmüşken, 80 °C'de tamamı çözünebilmiştir. Ayrıca, kömürle birlikte yapılan liç deneyleri sırasında borik asidin yeterince çözünüp-çözünmediğinin tespiti için pH ölçümleri yapılmıştır. Farklı sıcaklık ve borik asit konsantrasyonlarında yapılan pH ölçümleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8'den görülebileceği üzere, sıcaklık arttıkça pH değeri düşmekte (borik asit çözünmekte) ve ortamın asitliği yükselmektedir. Farklı borik asit konsantrasyonları için 20 °C sıcaklıkta çözeltinin pH değeri 3-3.5 arasında değişmekte iken, sıcaklığın 80 °C olması durumunda pH değeri 1.5'in altına kadar düşmüştür. Bu durum özellikle kül ve kükürt giderimi üzerine etkili olmuş ve sıcaklık arttıkça kül ve kükürt giderimi artmıştır.

Sonuç olarak, borik asit uygun miktarlarda ve uygun liç sıcaklık değerlerinde kullanılmak koşulu ile kömürden kül ve kükürdün giderilmesinde kullanılabilir alternatif bir reaktif olarak gözükmektedir.

Çizelge 2. Farklı Reaktif Konsantrasyonlarının Üründeki Kül Ve Kükürt İçeriğine Etkisi

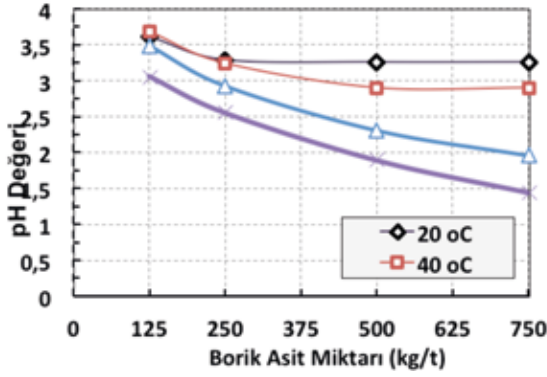
Reaktif Miktarı (kg/t)	Kullanılan Reaktif Tipleri							
	Borik Asit		Hidroklorik Asit		Sülfürik Asit		Hidroflorik Asit	
	Kül (%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Kükürt (%)
125	14.10	7.08	12.84	6.55	14.29	6.80	11.06	6.77
250	13.50	6.80	11.65	6.58	13.9	6.60	9.69	6.42
500	12.10	6.16	10.67	6.53	12.15	6.12	5.43	5.18
750	17.80	6.20	14.5	6.76	14.03	6.25	9.66	5.2
Toplam	14.62	8.77	14.62	8.77	14.62	8.77	14.62	8.77

Çizelge 3. Liç Sıcaklığının Üründeki Kül Ve Kükürt İçeriğine Etkisi

Liç Sıcaklığı (°C)	Kullanılan Reaktif Tipleri									
	Yalnızca Saf Su		Borik Asit		Hidroklorik Asit		Sülfürik Asit		Hidroflorik Asit	
	Kül(%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Kükürt (%)
20	14.60	6.90	17.43	8.23	14.15	6.62	14.14	7.10	9.69	6.50
40	14.00	6.62	14.90	7.75	11.63	6.55	13.02	6.36	6.45	5.80
60	13.85	6.57	12.10	6.16	10.67	6.53	12.15	6.12	5.43	5.18
80	13.27	6.52	10.92	6.10	7.96	5.81	11.75	6.10	4.29	5.02
Toplam	14.62	8.77	14.62	8.77	14.62	8.77	14.62	8.77	14.62	8.77

Tablo 6. 6: Liç Süresinin Üründeki Kül Ve Kükürt İçeriğine Etkisi

Liç Süresi (dk)	Kullanılan Reaktif Tipleri							
	Borik Asit		Hidroklorik Asit		Sülfürik Asit		Hidroflorik Asit	
	Kül (%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Kükürt (%)
60	14.00	7.12	13.29	6.46	13.34	6.96	5.44	6.09
120	10.92	6.10	7.96	5.81	11.75	6.10	4.29	5.02
240	9.74	5.98	7.53	5.47	9.69	5.90	3.47	4.46
360	8.60	5.95	7.12	5.34	8.32	5.90	3.02	4.27
Toplam	14.62	8.77	14.62	8.77	14.62	8.77	14.62	8.77



Şekil 8. Borik asit konsantrasyonuna bağlı olarak farklı sıcaklıklarda pH profilleri

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Tosya linyit kömüründen kül ve kükürdün en yüksek verimle giderilmesi için bir reaktif olarak borik asidin kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır. Literatürde kömürden kül ve kükürt gideriminde borik asit ilk defa bu çalışmada kullanılmış ve performansı HCL, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve HF gibi diğer inorganik asitlerle karşılaştırılmıştır. Tüm reaktif tipleri için liç veriminde etkili olan parametrelerden sıcaklık ve liç süresinin etkisi araştırılmıştır. Farklı asit tipleri kullanılarak -106 mikron tane boyutundaki Kastamonu Tosya kömürüne uygulanan liç işlemi sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1- Liç çözeltisine ilave edilen asit miktarı arttıkça kül ve kükürt giderimi de artmaktadır. Ancak 500 kg/t asit miktarının üzerinde verim çok fazla değişmemekte ve çoğu zaman düşmektedir. Bu bakımdan tüm reaktifler için optimum asit miktarı 500 kg/t olarak belirlenmiştir. Bu miktar liç çözeltisinde %9.09 asit konsantrasyonu değerine tekabül etmektedir.

2- Liç sıcaklığı arttıkça, hem reaktif çözünürlüğü hem de kömürdeki inorganik bileşiklerin çözünürlüğü artmakta ve bunun sonucunda kömürdeki kül ve kükürt değerleri azalmaktadır. Örneğin HF ile liçte, sıcaklığın 20 °C'den 80 °C'ye çıkarılması durumunda, ürünün kül değeri %9.67'den %4.29'a düşmektedir. Sıcaklık, her reaktif tipi için verimde ortalama %10 ile %30 arasında değişen bir iyileşme sağlamaktadır.

3- Liç süresinin arttırılması kül ve kükürt gideriminde olumlu etki yapmaktadır. Örneğin borik asit ile 60 dk liç sonunda kömürün külü %14 olurken, 360 dk sonunda kömürün külü %8.6 olmaktadır.

4- Kül ve kükürt gideriminde en etkili reaktif hidroflorik (HF) asittir. HF kömürün külünü %14.62'den %3.02'ye, kükürdünü ise %8.77'den %4.27'ye düşürmüştür. HF asidi ile kül giderim verimi %79.34, kükürt giderim verimi %51.31 bulunmuştur.

5- Borik asit zayıf bir asit olduğu için HF kadar iyi sonuç vermemiştir. Borik asit en iyi koşulda kömürün külünü %8.6'ya, kükürdünü %5.95'e düşürmüştür. Borik asidin kül giderim verimi %41.18, kükürt giderim verimi %32.16'dır.

6- Reaktif kullanmadan sıcak su ile liç yapılarak Tosya kömürünün külünde ve kükürdünde iyileşme sağlanabileceği görülmüştür. Sıcak (80 °C) saf su ile 360 dk çalkalama (liç) sonunda kül %14.62'den %13.27'ye, kükürt %8.77'den %6.52'ye düşmüştür.

7- Genel olarak borik asitle kükürt giderimi diğer asitlerle rekabet edebilecek durumda iken, kül giderimi bakımından diğer asitlere göre daha düşük performans göstermiştir. Örneğin, sülfürik asidin kükürt giderimi %32.73 iken, borik asidin kükürt giderimi %32.16'dır. HF ve HCL'nin kükürt giderim değerleri ise sırasıyla %51.31 ve %39.11'dir.

8- Dünya bor rezervlerinin %70'inin ülkemizde olduğu düşünülürse, bu kaynağın liç ve diğer işlemlerde kullanılabilirliğinin araştırılması, ülke kaynaklarını değerlendirme olanaklarının arttırılması bakımından büyük önem arz etmektedir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı 10856 No'lu projesi ile destekleyen İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ve numunelerin teminini için Maden Mühendisi Cengiz ÖZDAĞ'a teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR

Eker, Y., 2007. Kömürdeki Piritik Kükürdün Giderilmesinde Çeşitli Yöntemlerin Kıyaslanması, Bilim Uzmanlığı Tezi, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Zonguldak, p.87.

Elsamak, G. 1999. Mikrodalga Enerjisinin Kömür Reaksiyonlarındaki Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi (yayımlanmamış) Hacettepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Ankara, 167 s.

Elsamak, G., Öztaş, A. N. and Yürüm, Y. 2003.

Chemical Desulphurisation of Turkish Cayırhan Lignite with HI using microwave and thermal energy, Fuel, Vol.82, pp.531–537.

Hayashi, J.I., 1990. The Role of Microwave Irradiation in Coal Desulphurisation With Molten

Caustics, Fuel, 69, (6), 739-742.

Honaker, R.Q. ve Das, A., 2004. Ultrafine coal cleaning using a centrifugal fluidized-bed separator”, Coal Preparation, 24, 1-18.

Hacıfazlıoğlu, H., 2009. İnce boyutlu kömürlerin temizlenmesi için yeni bir flotasyon makinesinin (siklojet Hücresinin) geliştirilmesi, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği ABD, Zonguldak, Doktora Tezi, s.220.

Jorjani, E., Rezai, B., Vossoughi, M. and Osanloo, M. 2004. Desulphurization of Tabas Coal with Microwave Irradiation/Peroxy Acedic Acid Washing at 25, 55 and 85 oC Fuel, Vol. 83, pp. 943-949.

Kawatra, S.K. ve Eisele, T.C., 1997. Pyrite rcovery mechanisms in coal flotation”, Int. Jour. of Mineral Processing, 50, 187-201.

Meyers, R.A., 1973. Removal of PyriticSulfur from Coal Using Solutions Containing Ferrous Ions, U.S. Patent 3768988.

Rowson, N.A. ve Rice, N., 1990. Desulphurisation of Coal Using Low Power Microwave Energy, Minerals Engineering, 3, 3/4, 363-368.

Toraman, Ö.Y., Depçi, T. 2007. Kömürde mikrodalga ile önışlem uygulamaları, Madencilik, Vol.46, No.3, pp 43-53.

Tosun Y.İ., 1995 Kömürün Ergiyik Kostik Liçi ile Kükürtsüzleştirilmesi, Mühendislikte 20 Yıl Sempozyumu, Zonguldak, MAD 14.

Tosun, Y.İ., Çiçek, F., Çekirge M.H., 1997. Ergiyik Kostik Liç Yöntemi İle Kömürlerin Kükürtsüzleştirilmesi, Madencilik, Vol.36, No.4, pp.5-9.

Toroğlu, İ., Kizgut,S., Çuhadaroğlu, D., Pilevneli, C., 2004. Kömür Teknolojisindeki gelişmeler; Dünyada ve Türkiye’ de kömür kalitesini arttırıcı uygulamalar, Kömür ve Enerji Semineri, 5-6 Mart 2004, Ankara.

Uslu, T. ve Atalay, U. 2003. Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite, Fuel Processing Technology, Vol. 85, pp. 21-29.



## SCHMIDT SERTLİĞİ İLE KESİLEBİLİRLİK PARAMETRELERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN İNCELENMESİ

### *Investigation of Relationships Between Cuttability Parameters and Schmidt Hardness*

Serdar YAŞAR\*  
Mehmet ÇAPIK\*\*  
Ali Osman YILMAZ\*\*\*

#### ÖZET

Bu çalışmada 5 farklı kayaç örneği (dolomitik kireçtaşı, fosilli kumtaşı, litik tuf, biyoklastik kireçtaşı, ve vitrik tuf) ve 2 farklı cevher örneği (bakır cevheri ve kurşun cevheri) üzerine kesilebilirlik parametreleri olarak belirlenen spesifik kesme kuvveti, spesifik normal kuvvet, spesifik enerji ve keski tüketim miktarının belirlenebilmesi için küçük boyutlu kesme deneyi, ve Cerchar aşındırıcılık deneyleri uygulanmıştır. Buna ilave olarak, numuneler üzerine Schmidt çekici deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen Schmidt sertliği değerleri kesilebilirlik parametreleri ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak Schmidt sertliği ile tüm kesilebilirlik parametreleri arasında üstel ilişkiler elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında Schmidt sertliğinin bu parametreler üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Küçük boyutlu kesme deneyi, kesilebilirlik, Cerchar aşındırıcılık deneyi, Schmidt çekici

#### ABSTRACT

In this study, 5 different rock samples (dolomitic limestone fossilized sandstone, lithic tuff, bioclastic limestone and vitric tuff) and 2 different ore samples (copper ore and lead ore) were subjected to small scale rock cutting test and Cerchar abrasivity test for determination of cuttability parameters which are namely; specific cutting force, specific normal force, specific energy and pick wear rate. In addition to this, Schmidt hammer test was applied on rock and ore samples and Schmidt hardness values were tried to be correlated with cuttability parameters. As a result, exponential relationships were detected between Schmidt hardness and all cuttability parameters. According to these results, it can be stated that Schmidt hardness is an affective parameter on cuttability parameters.

**Keywords:** Small scale rock cutting test, cuttability, Cerchar abrasivity test, Schmidt hammer

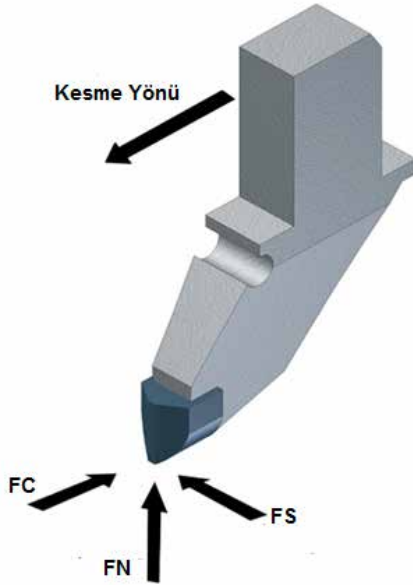
\* Arş. Gör., Karadeniz Teknik Ün., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., TRABZON, seyasar@ktu.edu.tr

\*\* Arş. Gör., Karadeniz Teknik Ün., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., TRABZON

\*\*\* Prof. Dr., Karadeniz Teknik Ün., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., TRABZON

## 1.GİRİŞ

Mekanize kazı, delme patlatma yöntemine karşı tek alternatif olarak gözükmemektedir. Ancak yanlış makine seçimi hem projenin uzamasına hem de ekonomik olarak projenin bekleneni vermemesine sebep olmaktadır. Bundan dolayı, kazı yapılacak formasyona uygun makinenin seçilmesi, kazı operasyonun başarısını belirlemektedir. Roxborough (1987) belirli bir jeolojik formasyon için kesilebilirliği, spesifik kesme kuvveti (SFC), spesifik normal kuvvet (SFN), spesifik enerji (SE) ve keski aşınma hızı parametreleriyle tanımlamıştır. Formasyonun mekanize kazıya uygunluğunun araştırılmasına genellikle kazı sırasında kullanılacak olan keskilere gelecek kuvvetlerin belirlenmesiyle başlanmaktadır. Kazı sırasında keskilere 3 boyutta kuvvetler etkimektedir. Bunlar; kesme kuvveti (FC), normal kuvvet, (FN) ve yanal kuvvettir (FS) (Şekil 1). Formasyonun mekanize kazıya uygunluğunun araştırılması için farklı yöntemler ileri sürülmüştür. Bunlar; kesme teorileri, kayaç kesme deneyleri, ampirik yöntemler ve nümerik yöntemlerdir.

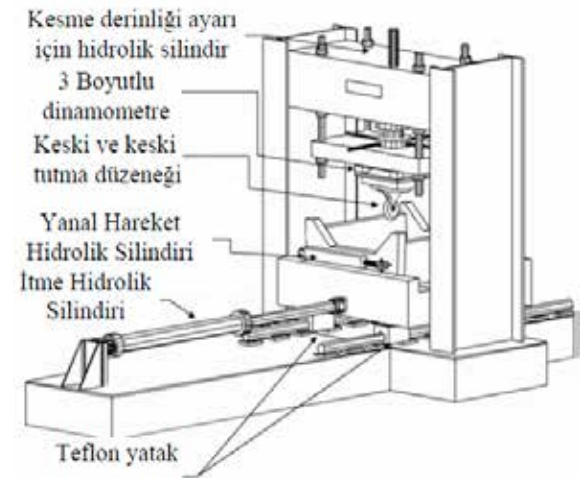


Şekil 1. Keskiye gelen 3 boyuttaki kuvvetler (Abu Bakar ve Gertsch, 2013'ten değiştirilerek).

Keski kuvvetlerinin teorik olarak bulunabilmesi için kesme teorileri önerilmiştir. Çalışmada kama uçlu keski kullanıldığı için yalnızca kama uçlu keskilere için önerilen kesme teorilerinden bahsedilecektir. Kesme teorilerinin ilkinin Merchant (1945) ortaya atmıştır. Önerdiği kesme teorisinde metal kesmenin teorik açıklamasına yer vermiştir ve kesme işleminin malzemenin kesme dayanımı ( $\sigma_c$ ) ile ilgili olduğunu ileri sürmüştür.

İlk kayaç kesme teorisini Evans (1962) önermiştir ve bu teoride kömürün kazıcı uçlarla kesilmesinin genel prensipleri belirlenmiştir. Evans (1962)'ye göre FC kayacın çekme dayanımı ( $\sigma_t$ ) ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Kömür dışındaki kayaçlar için ilk önerilen kesme teorisini ise Nishimatsu (1972) önermiştir. Nishimatsu (1972), Merchant (1945)'te önerilen metal kesme teorisini kayaçlara uygulamıştır ve bu teoriye göre FC,  $\sigma_s$  ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Keski kuvvetlerinin bulunması ile öncelikle FC'den yararlanılarak SE hesaplanabilmektedir. Bunun yanında keski kuvvetleri makinenin tasarım parametreleri olarak kullanılmaktadır. FC makinenin tork ihtiyacının hesaplanmasında, FN ise makinenin itme gücünün hesaplanmasında kullanılmaktadır (Bilgin vd, 2014).

Keski kuvvetlerinin deneysel olarak bulunabilmesi için kayaç kesme setleri üretilmiştir. Bunlar; tam boyutlu kesme seti ve küçük boyutlu kesme setidir. Tam boyutlu kazı deneyinde gerçek kesimler ve büyük kaya parçaları ( 70 cm x 50 cm x 50 cm ) kullanılabilir. Kazı makinelerinde keski kuvvetlerinin bulunmasında en kesin yöntem tam boyutlu kazı deneyinde kesme yapmaktır. Bu kazı setinde farklı tipte keskilere kullanılabilir. Keskilere gelen kesme kuvveti, normal kuvvet ve yanal kuvvet dinamometre vasıtasıyla ölçülerek bilgisayara gönderilmektedir (Feridunoğlu ve Bilgin, 2010). Şekil 2'de tam boyutlu kesme seti görülmektedir.



Şekil 2. Tam boyutlu kesme setinin şematik görünümü (Feridunoğlu ve Bilgin, 2010).

Küçük boyutlu kazı seti ise bir kayacın kazılabilirlik tayininin doğrudan yapılabilmesi için geliştirilmiştir. Deney, Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) tarafından standart deney yöntemi



olarak önerilmiştir. Deneyde 7,6 cm veya daha küçük çaplı karot numuneleri veya 20 cm x 10 cm x 10 cm boyutlarında blok numune kesilebilmektedir.

Nümerik yöntemlerde ise çeşitli araştırmacılar kayaç kesme olayını bilgisayarda modelleyerek keskiye gelecek kuvveti tahmin etmeye çalışmışlardır (Kou vd, 1999; Rojek, 2007; Su ve Akcin, 2010; Rojek vd, 2011; Lei ve Kaitkay, 2003).

SE kazı verimliliğinin en iyi göstergesidir (Rostami vd, 1994). SE'nin formülü şu şekildedir:

$$\epsilon = \frac{E}{Q} \quad (1)$$

Burada; SE spesifik enerji (MJ/m<sup>3</sup>), FC ortalama kesme kuvveti (kN) ve Q 1 km kazıda ortaya çıkacak olan pasa hacmidir (m<sup>3</sup>/km). Bunun dışında SE'den yararlanılarak seçilen bir makine için anlık kazı hızı şu formül yardımı ile hesaplanabilmektedir (Rostami vd, 1994):

$$ICR = k \frac{P}{\epsilon} \quad (2)$$

Burada; ICR anlık kazı hızı (m<sup>3</sup>/saat), P makinenin kesici kafasının kurulu gücü (kW), SE ise tam boyutlu kesme deneyinden elde edilen optimum spesifik enerji (kWh/m<sup>3</sup>) ve k enerji transfer oranı (0,45-0,90 arasında değişmektedir).

Kesilebilirliği etkileyen diğer bir önemli parametreye ise keski aşınma hızıdır. Keski aşınma hızının tahminine yönelik birtakım deneyler ortaya atılmıştır. Bu deneylerden en önemlisi Cerchar aşındırıcılık deneyidir. Bu deneyde Cerchar aşınma indeksi (CAI) hesaplanmaktadır ve dolaylı olarak keski tüketim hızı hesaplanabilmektedir (Johnson ve Fowell, 1986).

Kayaç kesilebilirliği 4 parametre ile tanımlanmıştır. Tüm bu parametrelerin belirlenmesi zahmetli ve büyük ekonomik imkânlara ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeplerden dolayı çeşitli araştırmacılar bu parametrelerin dolaylı olarak hesaplanabilmesi ya da bu parametreleri etkileyen kayaç özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır. SFC, spesifik kesme kuvvetidir ve birim kesme derinliğine gelen kesme kuvvetidir. SFC nin birimi genellikle kN/mm'dir. SFN ise spesifik normal kuvvettir ve birimi genellikle kN/mm'dir. Çeşitli araştırmacılar keskilere gelen kuvvetlerin (SFC veya FC, SFN veya FN) kazılacak formasyonun mekanik özelliklerinden

nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla ve aynı zamanda bu kuvvetlerin ampirik olarak bulunabilmesi için birtakım çalışmalar yapmışlardır. Fowell vd (1992)'nin çalışması incelendiğinde, çeşitli kayaçlar üzerinde gerçekleştirdikleri kesme deneyleri ve kaya mekaniği deneyleri sonucunda FC'nin tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ) ve elastisite modülü (E) ile lineer olarak arttığını gözlemlenmiştir. Çopur vd (2001) 'nin yaptığı çalışmanın ham verileri değerlendirildiğinde FC ve FN'nin  $\sigma_c$  ve  $\sigma_t$  ile lineer olarak arttığı görülmektedir. Bir araştırmacı çeşitli kayaçlarını tam boyutlu kesme deneyine ve kaya mekaniği deneylerine tabi tutmuştur ve sonuç olarak FN'nin  $\sigma_c$  ve  $\sigma_t$  ile arttığını belirlemiştir (Yağız, 2006). Dursun ve Gökay (2014) farklı kayaç numunelerini küçük boyutlu kesme deneyine tabi tutmuşlardır ve farklı mekanik özellikleri kullanarak keski kuvvetlerini tahmin etmeye çalışmışlardır.

Diğer önemli bir parametre olan SE'nin ampirik yöntemlerle bulunması ve SE'yi etkileyen kayaç özelliklerinin belirlenmesi amacıyla birçok araştırmacı çalışma yapmıştır. McFeath-Smith ve Fowell (1979) küçük boyutlu kesme deneyinden elde edilen SE değerini belirli kayaç özelliklerinden faydalanarak çoklu regresyon yöntemi ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Roxborough (1987) çeşitli kayaçlar üzerinde kesme deneyleri gerçekleştirmiş ve SE ile  $\sigma_c$  arasında lineer ilişki elde etmiştir. Çopur vd (2001) farklı cevher ve kayaç örneğini tam boyutlu kesme deneyinde kesme deneyine tabi tutmuştur ve sonuç olarak SE'nin  $\sigma_c$  ve  $\sigma_t$  ile arttığını ve aynı zamanda  $\sigma_c$  ve  $\sigma_t$  'nin çarpımı ile de arttığını ileri sürmüşlerdir. Balcı vd (2004) çalışmalarında SE ile tüm mekanik özellikler arasında anlamlı ilişkiler elde etmişlerdir. Tiryaki ve Dikmen (2006) altı farklı kumtaşı örneğini küçük boyutlu kesme deneyine tabi tutmuştur ve elde edilen SE değerini kumtaşlarının mekanik, fiziksel ve mineralojik özellikleri ile ilişkilendirmişlerdir. Tümaç vd (2007) kayaç kesilebilirliğini Shore sertliği ve  $\sigma_c$  ile tahmin etmeye çalışmışlardır ve SE ile bu parametreler arasında anlamlı ilişkiler elde etmişlerdir. Bir grup araştırmacı farklı cevher örneklerini küçük boyutlu kesme deneyinde keserek bulunan SE değerleri ile cevherlerin mekanik özelliklerini ilişkilendirmişlerdir ve sonuç olarak SE ile  $\sigma_c$  ve  $\sigma_t$  arasında üstel bir ilişki elde etmişlerdir (Çomaklı vd, 2014).

Aşındırıcılık değerlendirilirken iki önemli parametreden bahsedilebilir. Bunlar;  $\sigma_c$  ve kuvars içeriğidir. Ancak Johnson ve Fowell (1986) 'ya

göre kayacın aşındırıcılığı değerlendirilirken  $\sigma_c$  iyi bir gösterge olmakla birlikte yeterli olmamaktadır. CAI ya da keski tüketimi üzerine yapılan çalışmalar genellikle mineralojik kapsamda gerçekleştirilmiştir ve çoğunlukla kayacın kuvars içeriği ile ilişkilendirilmiştir (Suana ve Peter, 1982; West,1986; Al-Ameen ve Waller, 1994; Pillinger vd, 2002; Pillinger vd, 2003).

Schmidt çekici öncelikle betonların yüzey sertliğini ve dolayısıyla da betonun basınç dayanımını tahmin etmek için geliştirilmiştir (Schmidt, 1951). 1960'lardan günümüze ise kaya mekaniği uygulamalarında  $\sigma_c$  tahmininde kullanılmaktadır. Aynı zamanda farklı çalışmalarda, kazı makinesinin performans tahmininde kullanılabilirliği (Poole ve Farmer, 1978; Bilgin vd, 1990). Çeşitli araştırmacılar, SFC, SFN ve SE gibi parametreleri Schmidt sertliği (R) ile ilişkilendirmeye çalışmışlardır. Ancak hiçbir çalışmada tüm parametreler (SFC, SFN, SE ve CAI) bir arada incelenmemiştir. Bu çalışmada R ile tüm kesilebilirlik parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, 7 farklı kaya örneğine küçük boyutlu kesme deneyi, Cerchar Aşındırıcılık deneyi ve Schmidt çekici deneyleri uygulanmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Numuneler

Çeşitli kayaç ve cevher örnekleri Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan işletme ve sahalarından temin edilmiştir. Bu numuneler; dolomitik kireçtaşı (DK), fosilli kumtaşı (FK), litik tuf (LT), biyoklastik kireçtaşı (BK), bakır cevheri (O1), kurşun cevheri (O2) ve vitrik tüftür (VT). Kayaç ve cevherlerin mineralojik-petrografik açıklamaları Çizelge 1'de verilmiştir. Kayaç ve cevher örnekleri sahadan alınarak laboratuvarında deneysel çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için karot halinde alınıp, kesilip ve düzeltilmiştir.

### 2.2. Küçük Boyutlu Kesme Deneyi

Küçük boyutlu kesme deneyi İstanbul Teknik Üniversitesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deney şartları şu şekilde belirlenmiştir:

Kesme açısı : -5o,

Temizleme açısı: 5o,

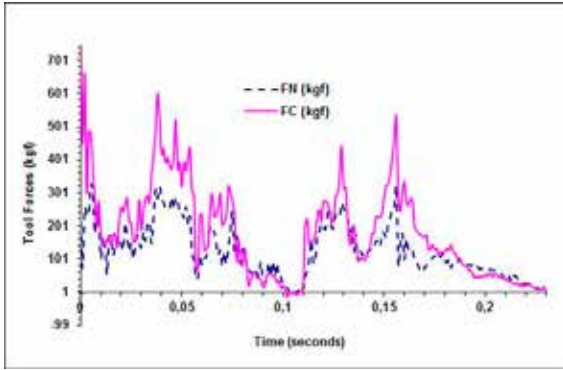
Keski genişliği : 12,7 mm,

Keski ucu : Tungsten karbid, % 10 kobalt.

Çizelge 1. Numunelerin Petrografik-Mineralojik Açıklamaları

Numune	Açıklama
DK	Başlangıçta mikritik kireçtaşı olan örnek, daha sonradan gelişen öz şekilli dolomit mineralleri içermektedir. Mikritik kesim içinde fosil parçaları tanınabilmektedir. Kayacın % 50'si kalsit, 45' dolomit, ve % 5'i fosillerden meydana gelmektedir. Dolomit minerallerinin tane boyutu 0,01 mm ile 0,2 mm arasında değişmektedir. Dolomit mineralleri köşeli ve öz şekillidir. Yeni oluşan dolomit mineralleri fosilleri yersel olarak ornatmaktadır. Bu durum dolomitin daha sonra geliştiğini göstermektedir.
FK	Klastik dokulu ve karbonat çimentolu örnek mikro fosil içeriği açısından olukça zengindir. Kayaç yaklaşık % 60 mikro fosil (önemli oranda nummulites fosilleri), % 25 kuvars, % 10 kayaç (volkanik kayaç) ve % 5 plajiyoklas tanelerinden meydana gelmektedir. Tane boyutları 0,1 ile 2,5 mm arasındadır. Kuvars ve kayaç taneleri çoğunlukla yuvarlak ve yarı-yuvarlak özellik sunmaktadırlar. Kayaç parçaları volkanik kayaç, kuvarsit ve mikritik kireçtaşları tarafından temsil edilirler. Plajiyoklas minerallerinin bir bölümü bozuşma sonucu killeşmişlerdir.
LT	Kaba taneli ve kırıntılı dokuya sahip olan kayaç cam, plajiyoklas, klinopiroksen mineralleri ve bol miktarda volkanik kayaç parçalarından oluşmaktadır. Kayacı meydana getiren kırıntılı tane bollukları sırasıyla % 80 kayaç kırıntısı, % 20 plajiyoklas ve klinopiroksenden oluşmaktadır. Bileşen boyutları 3 mm ile 0,5 mm arasında değişmektedir. Kayaç parçaları çoğunlukla köşelidir. Özellikle camsı alanlar bozuşmuştur.
BK	Kırıntılı dokulu kayacın yaklaşık % 20'si kırıntılardan, % 80'i ise fosillerden (foraminifer fosilleri) oluşmaktadır. Kayaç parçaları kireçtaşı ve volkanik kayalardan türemişlerdir. Kırıntılı tanelerin ortalama tane boyutu 3 mm ile 0,5 mm arasında değişmektedir. Karbonat çimentolu kayaçta tanelerin % 80'ni yarı yuvarlak % 20'si ise köşeli niteliktedir.
O1	Kayaç pirit ve kalkopiritten oluşmaktadır.
O2	Kayaç pirit ve galen minerallerinden oluşmaktadır.
VT	<b>Örneğin</b> % 20'si kristallerden % 80'ni ise camdan meydana gelmektedir. % 20'lik kesim köşeli taneli kuvars, plajiyoklas ve sanidin minerallerinden oluşmaktadır. Kuvars, plajiyoklas ve sanidin minerallerinin tane boyutları yaklaşık 0,01 mm ile 0,25 mm arasında değişmektedir.

Deney, 54 mm'lik karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Karot örnekleri numune kutusuna yerleştirilmiş ve deney başlatılmıştır. Kesme işlemi her numune için 2 ile 3 kez tekrar edilmiştir. Elde edilen değerler bunların ortalamasıdır. Ardından kazı sırasında keskiye gelen üç boyutlu kuvvetler dinamometre vasıtasıyla elektrik yüküne dönüştürülmüştür. Arabirimler sayesinde elektrik yüküne çevrilen kuvvet kgf cinsinden bilgisayara saniyede 2000 veri hızıyla kaydedilmiştir. Şekil 3'te biyoklastik kireçtaşı numunesinin kazısı sırasında oluşan kuvvetlerin kaydedilmesiyle oluşan kuvvet-zaman grafiği görülmektedir. Bu çalışmada yalnızca kesme kuvveti ve normal kuvvete yer verilmiştir, yanıl kuvvet ihmal edilmiştir.



Şekil 3. Biyoklastik kireçtaşının kazısı sırasında oluşan kuvvet-zaman grafiği

### 2.3. Cerchar Aşındırıcılık Deneyi

Cerchar aşındırıcılık deneyinde 90° uç açılı, 2000 kg/cm<sup>2</sup> çekme dayanımına sahip HRC (Rockwell) sertliği 55 olan uçlar kullanılmaktadır. Deney aletine yerleştirilen ucun altına örnek yerleştirilir. 70 N yük altında örneğin üzerine oturtulan uç 1 cm çekilir. Kullanılan uç mikroskop altında incelenmek üzere kodlanarak kaldırılır. Her uç tek sefer kullanılmıştır. Deney karot kesme testeresi ile düzeltilmiş yüzeylere uygulanmıştır. Her örnek üzerinde 3 deney yapılmıştır. Deneyin ikinci aşamasında uçlar mikroskop altında 40x büyütme ile incelenmiştir. Uçtaki her 1/10 mm'lik körelme 1 Cerchar'a (CAI) eşit olmaktadır. Deney kırılmış pürüzlü yüzeylere uygulandığı gibi pürüzsüz yüzeylere de uygulanabilmektedir. Ancak pürüzsüz yüzeylere uygulandığında bağıntı (3) yardımı ile düzeltilmesi gerekmektedir (Pillinger vd, 2003).

$$CAI = 0,99 CAI_s + 0,48 \quad (3)$$

Burada CAI pürüzlü yüzeyde Cerchar aşındırıcılık indeksi ve CAI<sub>s</sub> pürüzsüz yüzeyde Cerchar

aşındırıcılık indeksidir. Deneyler pürüzsüz yüzeyler üzerine uygulandığından dolayı bu bağıntı yardımı ile düzeltilerek kullanılmıştır.

### 2.4. Schmidt Çekici Deneyi

Schmidt çekici deneyleri ISRM (1981) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan 54 mm çapındaki karot örnekleri V tipi numune beşiğine yerleştirilerek Schmidt çekici ile üzerine 10 vuruş gerçekleştirilmiştir. Deneylerde L tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. Art arda ve farklı noktalara yapılan 10 vuruş büyükten küçüğe sıralanarak en büyük beş değer ortalaması alınmıştır ve bu değer sertliği olarak belirlenmiştir. Şekil 4'te kullanılan Schmidt çekici, numune ve numune beşiği görülmektedir.



Şekil 4. Kullanılan Schmidt çekici, numune beşiği ve karot numunesi

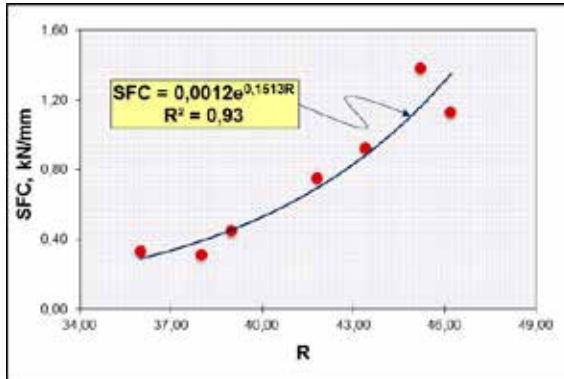
## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen tüm deneylerin sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında grafikler hazırlanmıştır ve R değeri ile kesilebilirlik parametreleri arasındaki ilişkiler irdelenmiştir.

Çizelge 2. Deneysel Çalışmaların Sonuçları

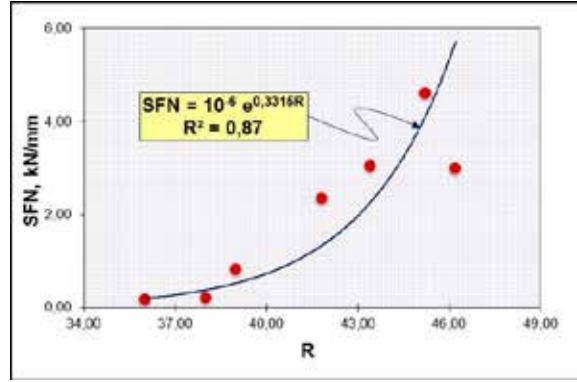
Numune	R	SFC (kN/mm)	SFN (kN/mm)	SE (MJ/m <sup>3</sup> )	CAI
DK	41,80	0,75	2,34	37,28	1,50
FK	43,40	0,92	3,05	42,85	1,41
LT	39,00	0,45	0,81	28,56	1,17
BK	36,00	0,33	0,17	17,35	0,95
O1	46,20	1,13	2,99	43,70	1,65
O2	45,20	1,38	4,61	70,57	3,14
VT	38,00	0,31	0,20	18,03	1,02

Şekil 5 ve 6'dan görüldüğü gibi R değeri ile SFC ve SFN arasında üstel ve yüksek determinasyon katsayısına sahip bir ilişki elde edilmiştir. Önceki çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmalar genellikle SFC ve SFN ile  $\sigma_c$  arasındaki ilişkiler üzerine yoğunlaşmıştır (Fowell vd, 1992; Çopur vd, 2001; Yağız, 2006; Dursun ve Gökay, 2014). R değeri  $\sigma_c$ 'nin dolaylı olarak bulunmasında kullanıldığı bilinmektedir. Bu sonuçlara göre R değeri de belirtilen kesme koşullarında SFC ve SFN tahmininde kullanılabilir.

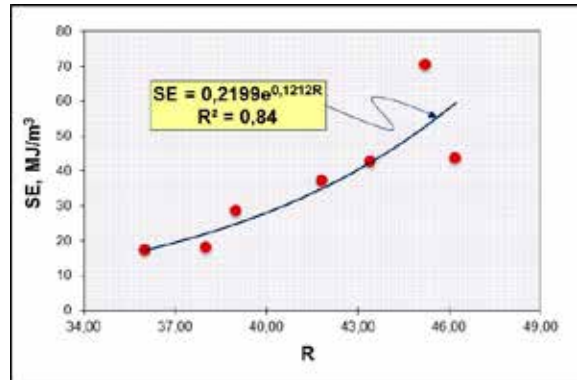


Şekil 5. R değeri ile SFC parametresi arasındaki ilişki

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde SE'nin genellikle  $\sigma_c$  ile ilişkileri irdelendiği görülmektedir (Roxborough, 1987; Çopur vd, 2001; Balcı vd, 2004; Tiryaki ve Dikmen 2006; Tümaç vd, 2007; Çomaklı vd, 2014). Bunlara ek olarak Tümaç vd (2007) çalışmalarında Shore sertliğini kullanarak SE değerini tahmin etmişlerdir. Shore deneyi ile Schmidt çekici deneyleri benzer mekanizmalara sahiptirler ve deney yapılan numunenin yüzey sertliğini belirlemede kullanılmaktadırlar. Şekil 7 SE'nin R değeri ile arttığını belirtmektedir. Bu da SE'nin yüzey sertliği arttıkça arttığını işaret etmektedir.

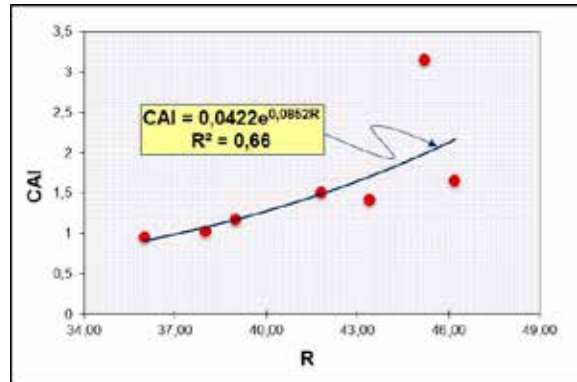


Şekil 6. R değeri ile SFN parametresi arasındaki ilişki



Şekil 7. R değeri ile SE parametresi arasındaki ilişki

Şekil 8'de CAI değerinin R ile arttığı görülmektedir. Ancak diğer şekiller incelendiğinde R değerinin CAI parametresini açıklamakta diğer parametrelerde olduğu kadar başarılı olmadığı görülmektedir. CAI ya da keski tüketimi araştırılırken araştırmacılar genellikle kuvars içeriğine başvurmuşlardır (Suana ve Peter, 1982; West, 1986; Al-Ameen ve Waller, 1994; Pillinger vd, 2002; Pillinger vd, 2003). Şekil 8'den elde edilen sonuca göre R değerinin belirli bir oranda CAI parametresini açıklamakta olduğu görülmektedir ama tek başına yeterli olmamaktadır.



Şekil 8. R değeri ile CAI parametresi arasındaki ilişki

#### 4. SONUÇLAR

Çalışmanın sonuçları incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

Keski kuvvetleri (SFC ve SFN) R parametresinden etkilenmektedir. R numunenin yüzey sertliğini temsil ettiğinden dolayı bu ilişkinin sebebinin numunenin yüzey sertliği olabileceği düşünülmektedir.

Aynı şekilde SE'nin R değerinin artması ile arttığı belirlenmiştir. Bunun sebebinin numunenin yüzey sertliği olabileceği tahmin edilmektedir.

CAI ile R arasındaki ilişki incelendiğinde, R değerinin CAI üzerinde belirli bir oranda etkili olduğu ancak tek başına açıklamaya yeterli olmadığı görülmüştür.

Çalışmadan elde edilen veriler, kesilebilirlik parametreleri ile Schmidt sertliği arasındaki ilişkileri belirleme amacıyla kullanılmıştır. R değeri ya da numunenin yüzey sertliğinin kesilebilirlik parametreleri üzerinde etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak daha kesin genellemelerin yapılabilmesi amacıyla daha geniş çaplı deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

#### TEŞEKKÜR

Yazarlar, başta Prof. Dr. Nuh BİLGİN, Prof. Dr. Hanifi ÇOPUR ve Doç. Dr. Deniz TÜMAÇ olmak üzere tüm İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi A.B.D. personeline teşekkürlerini sunarlar.

#### KAYNAKLAR

Abu Bakar, M.Z. ve Gertsch, L.S., 2013; "Evaluation of Saturation Effects on Drag Pick Cutting of a Brittle Sandstone from Full Scale Linear Cutting Tests", *Tunn. and Und. Spa. Tech.*, 34, 124-134.

Al-Ameen, S.I. ve Waller, M. D., 1994; "The Influence Of Rock Strength And Abrasive Mineral Content On The Cerchar Abrasivity Index", *Eng Geol*, 36, 293-301.

Balcı, C., Demircin, M.A., Çopur, H. ve Tunçdemir, H., 2004; "Estimation of Optimum Specific Energy Based on Rock Properties for Assessment of Roadheader Performance", *J. of South. Af. Inst. of Min. and Met.*, 104, 633-642.

Bilgin, N., Seyrek, T., Shahriar, K., 1990; "Roadheaders Glean Valuable Tips for Istanbul Metro Tunnels",

*Tunnelling*, Oct, 29-32.

Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., 2014; "Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries", CRC Press, 366 s.

Çomaklı, R., Kahraman, S., Balcı, C., 2014; "Performance Prediction of Roadheaders in Metallic Ore Excavation", *Tunn. and Und. Spa. Tech.*, 40, 38-45.

Çopur, H., Tunçdemir, H., Bilgin, N., Dinçer, T., 2001; "Specific Energy as a Criterion for Use of Rapid Excavation Systems in Turkish Mines", *Trans. of the Inst. of Min. and Met. Sec. A*, 110, 149-157.

Dursun, A.E. ve Gökay, M.K., 2014; "İstatistiksel Yaklaşım Kullanılarak Bazı Kayaç Özelliklerinden Kesme Kuvvetinin Belirlenmesi", *KAYAMEK'2014-XI. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Afyonkarahisar, Türkiye, 335-342.

Evans, I., 1962; "A Theory of The Basic Mechanics of Coal Ploughing", *International Symposium on Mining Research*, Missouri, 761-798.

Feridunoğlu, C. ve Bilgin, N., 2010; "Kayaç Kazılabilirliğinin Tayini İçin Taşınabilir Kayaç Kesme Deneysel Aletin Geliştirilmesi", *İtüdergisi*, 9 (3), 66-74.

Fowell, R.J., Gillani, T. ve Altınoluk, S., 1992; "Wear Characterization of Rock", *EUROCK*, Chester, England, 13-18.

ISRM, 1981; "Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM suggested Methods", Pergamon Press, 211 s.

Kou, S.Q., Lindqvist, P.A., Tang, C.A., Xu, X.H., 1999; "Numerical Simulation of The Cutting of Inhomogeneous Rocks", *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 36, 711-717.

Lei, S.T. ve Kaitkay, P., 2003; "Distinct Element Modeling of Rock Cutting Under Hydrostatic Pressure", *Key Engineering Materials*, 250, 110-117.

McFeat-Smith, I., Fowell, R.J., 1979; "The Selection and Application of Roadheaders for Rock Tunneling". *The Rapid Excavation And Tunneling Congress*, Atlanta, 261-279.

Merchant, M.E., 1945; "Basic Mechanics of the Metal Cutting Process", *Journal of Applied Mechanics*, 66, 168-175.

Nishimatsu, Y., 1972; "The Mechanics of Rock Cutting", *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 9, 261-270.

Plinninger, R.J., Spaun, G., Thuro, K., 2002; "Predicting Tool Wear in Drill and Blast", *Tunnels & Tunnelling International*, Apr, 1-5.

Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K., Spaun, G., 2003; "Testing Conditions and Geomechanical Properties Influencing The Cerchar Abrasiveness Index (CAI)

Value”, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 40, 259–263.

Poole, R.W. ve Farmer, I.W. 1978; “Geotechnical Factors Affecting Tunneling Machine Performance in Coal Measures Rock”, *Tunnels & Tunnelling International*, Dec, 27–30.

Rojek, J., 2007; “Discrete Element Modelling of Rock Cutting”, *Computer Methods in Materials Science*, 7 (2), 224-230.

Rojek, J., Onate, E., Labra, C., Kargl, H., 2011; “Discrete Element Simulation of Rock Cutting”, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 48, 996-1010.

Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D.M., 1994; “Performance Prediction: A Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining”, *Min. Eng.*, 1263–1267.

Roxborough, F.F., 1987; “The Role of Some Basic Rock Properties in Assessing Cuttability”, *Seminar on Tunnels, Wholly Engineered Structures*, Sydney, Australia, 21 s.

Schmidt, E., 1951; A Non-Destructive Concrete Tester, *Concrete*, 59, 34–35.

Su, O. ve Akcin, N.A., 2011; “Numerical Simulation of Rock Cutting Using The Discrete Element Method”, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 48, 434-442.

Suanai M. ve Peters, T., 1982; “The Cerchar Abrasivity Index and Its Relation to Rock Mineralogy and Petrography”, *Rock Mech.*, 15, 1-7.

Tiryaki, B. ve Dikmen, A.C., 2006; “Effect of Rock Properties on Spesific Cutting Energy in Linear Cutting of Sandstones by Picks”, *Rock Mech. and Rock Eng.*, 39, 89-120.

Tümaç, D., Bilgin, N., Feridunoğlu, C., Ergin, H., 2007; “Estimation of Rock Cuttability from Shore Hardness and Compressive Strength Properties”, *Rock Mech. and Rock Eng.*, 40, 477-490.

West, G., 1986; “A Relation Between Abrasiveness and Quartz Content for Some Coal Measures Sediments”, *Int. J. Min. Geo.I Eng.*, 4, 73–78.

Yağız, S., 2006; “Keski Kuvveti ve Kayaların Bazı Mühendislik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması”, *KAYAMEK’2006-VIII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, İstanbul, Türkiye*, 99-106.

## AŞIRI ÖĞÜTMEYLE MEKANİK OLARAK AKTİFLEŞTİRİLMİŞ ATIK MERMER TOZLARI KULLANILARAK YAPAY VOLLASTONİT ÜRETİMİ ve KULLANIMI

### *Production and Utilization of Synthetic Wollastonite by using Waste Marble Powders Activated Mechanically via Intensive Milling*

Meryem GÖKTAŞ\*  
Murat ERDEMOĞLU\*\*

#### ÖZET

Bu çalışmada, aşırı öğütme yoluyla mekanik olarak aktifleştirilmiş mermer sanayi toz atıkları çamuru ve kuvars tozu karışımları kullanılarak yapay wollastonit ( $\text{CaSiO}_3$ ) üretimi üzerinde durulmuştur. Yapay wollastonit üretimi sürecinde mermer ve kuvars tozu karışımının kavurma sırasındaki davranışının aşırı öğütmeyle etkileşiminin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Mermer tozu ve kuvars tozunun aşırı öğütme sonundaki davranışlarını gözlemlemek üzere, bilyalı jet değirmen kullanılarak tek başına ve karışım halinde öğütme testleri gerçekleştirilmiştir. Öğütülmemiş ve öğütülmüş karışımların yapısal ve termal özellikleri tanımlanmıştır. Karışımlarda  $900^\circ\text{-}1200^\circ\text{C}$  aralığında çeşitli sıcaklıklarda kavurma işlemiyle oluşan wollastonitin izleri aranmış ve karışımdaki  $\text{CaCO}_3$  ve  $\text{SiO}_2$ 'nin tamamıyla  $\text{CaSiO}_3$ 'e dönüştüğü sıcaklık belirlenmiştir. Yapay olarak üretilmiş wollastonit ve doğal wollastonit, seramik karo çamuru reçetesine değişik oranlarda eklenmiş ve elde edilen tabletler  $1000^\circ\text{-}1200^\circ\text{C}$  aralığında değişik sıcaklıklarda pişirilmiştir. Pişirme sonunda üretilen tabletlere çeşitli fiziksel, kimyasal termal ve mekaniksel testler uygulanarak, yapay ve doğal wollastonitin seramik malzemeye sağladığı özellikler karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, mermer tozu ve kuvars tozunun kavurma işlemi öncesinde aşırı öğütme yoluyla mekanik olarak aktifleştirilmesinin wollastonitin oluşum sıcaklığını düşürdüğü ve kullanıldığı seramik çamuruna pişirme sonrası olumlu katkılar sağladığı ortaya çıkarılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Mermer atıkları, Dönüştürme kavurması, wollastonit, mekanik aktivasyon

#### ABSTRACT

In this study, synthetic wollastonite ( $\text{CaSiO}_3$ ) production by using a mixture of marble industry waste sludge powders and quartz powders which were mechanically activated via intensive milling at the same time was emphasized. It has been intended to reveal the interaction between the behaviour of mixture of marble and quartz powders during roasting and intensive milling in the synthetic wollastonite production process.

In order to observe the behaviour of marble powder and quartz powder mixture at the end of intensive milling, milling tests were performed individually and as mixture by using a jet ball mill. Structural and thermal specifications of non-milled and milled mixtures were defined. The foot prints of wollastonite formed by roasting process at various temperatures in the range of  $900^\circ\text{-}1200^\circ\text{C}$  were searched for within the mixtures and the temperature at which the  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{SiO}_2$  in the mixture entirely convert to  $\text{CaSiO}_3$  is determined. Synthetically produced wollastonite and natural wollastonite were added to the ceramic tile formula and tablets acquired were fired at different temperatures in the range of  $1000^\circ\text{-}1200^\circ\text{C}$ . The specifications enabled to the ceramic material by synthetic and natural wollastonite were compared via running various physical, chemical, thermal and mechanical tests on tablets produced at the end of firing. In conclusion, it has been revealed that the process of mechanical activation of the mixture of marble powder and quartz powder via intensive milling prior to the roasting process, lowers the temperature at which wollastonite is formed, and provides favourable post-firing contributions to the ceramic tile sludge.

**KEYWORDS:** Marble waste, conversion roasting, wollastonite, mechanical activation

\* Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniv., Bozüyük Mes. Yük. Okulu, Doğal Yapı Taşları Böl., BİLECİK, meryem.goktas@bilecik.edu.tr

\*\* Prof., Dr., İnönü Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., MALATYA

## 1.GİRİŞ

Vollastonitin ana kullanım alanı seramik sanayidir. Seramik bünyelerde vollastonit kullanımının en önemli avantajı; pişirim süresini düşürmesi ve düşük sıcaklıklarda sinterlenebilme kabiliyetidir. Seramik malzemeler üretiminde feldspat, kalsit, kuvars, dolomit, talk gibi hammaddeler yerine veya seramik mamulün belirli özelliklerinin düzenlenebilmesinde vollastonit kullanılmaktadır. Bu sanayide vollastonit sıhhi tesisat ve çinilerde çatlamayı, sıkıştırmayı, kırılmayı ve mamüller üzerindeki ısı genleşmesini önlemesi bakımından aranan bir katkı maddesidir. Vollastonit kullanıldığında seramik ürünün gerek plastik halde, gerekse kurutulmuş halde iken dayanımı çok yüksektir. Vollastonit ayrıca kurumayı hızlandırmakta ve nemlilik genişlemelerini asgariye indirmektedir. Hamurdaki miktarı arttıkça fırınlama sürecinde kılma söz konusu olduğundan yakıtta da tasarruf sağlanmaktadır.

Endüstriyel tesislerde öğütme, enerjinin en yaygın ve en verimsiz olarak kullanıldığı işlem kademesidir. Özellikle, tane boyutu küçüldükçe tanelerin kırılmaya karşı olan dirençlerinin artmasıyla birlikte tüketilen enerji miktarları da aşırı bir şekilde artmaktadır. (Baláz, 2000, Wang ve Forsberg, 2007).

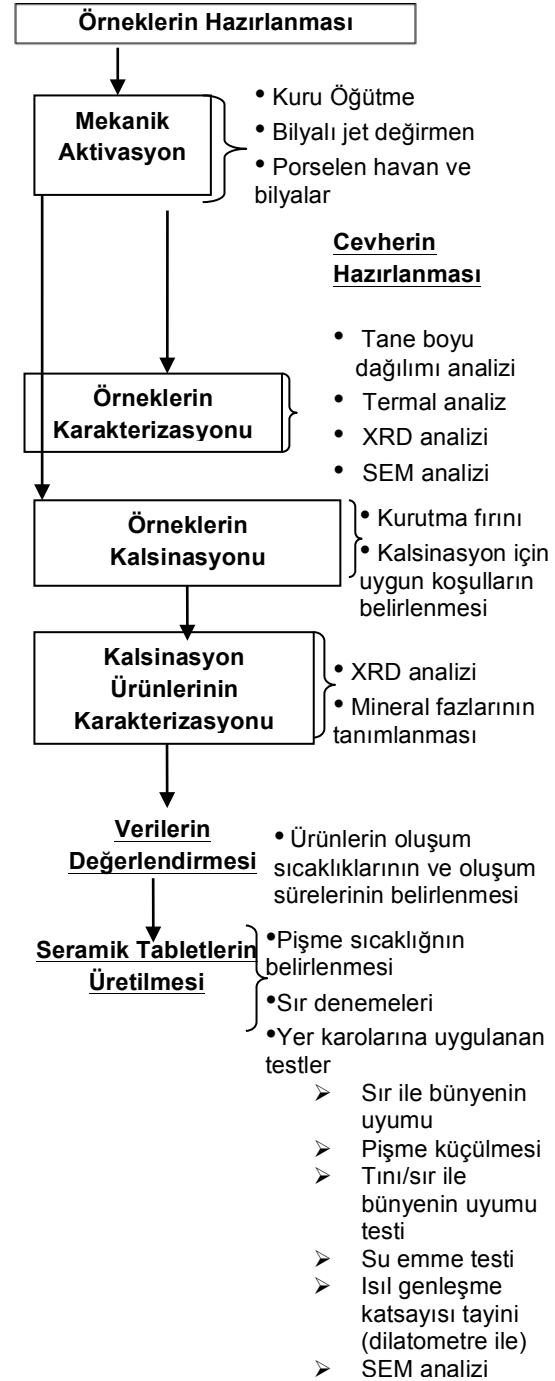
Cevherler üzerine uygulanan aşırı ince öğütmeye ise, ince tane sayısı artmakta, böylece daha önce ortaya çıkmamış taze yüzeyler oluşmaktadır (Boldyrev, 2004). Bunun sonucunda yarı-kararlı türler oluşur. Bu durum öğütülmekte olan mineralin reaktifliğinde değişime yol açtığı için mekanik aktivasyon olarak adlandırılır. Mekanik aktivasyon, kavurma ya da liçing gibi temel bir metalurjik süreç öncesinde mineralin bu süreçlerdeki durum değişimleri sırasındaki reaktifliğini artırmak üzere uygulanan bir ön-işlemdir.

Bu çalışmada, mekanik olarak aktifleştirilmiş mermer atık tozları kullanılarak üretilen yapay vollastonitin karo seramik üretiminde kullanılabilirliği araştırılmaktadır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada, yapay kalsiyum silikat üretiminde kullanılan çeşitli oranlarda karıştırılmış Afyon İncehisar Mermer Kalkınma Kooperatifi'nin (Afyon-Türkiye) atık havuzundan temin edilen beyaz mermer tozu çamuru numuneleri kurutulmuş ve Eczacıbaşı-ESAN'dan temin edilen kuru haldeki endüstriyel kuvars tozu örneği kullanılmıştır. Şekil 1'de deneysel yöntemin akım şeması ve

yapılan çalışmaların özeti verilmektedir (Göktaş, 2013).



Şekil 1. Deneysel yöntemin akım şeması ve yapılan çalışmaların özeti (Göktaş, 2013).

Numunelerinin kimyasal analizlerinde elde edilen hesaplamalar sonucunda kuvars tozunda SiO<sub>2</sub> miktarı yaklaşık % 98,96 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde mermer tozunda CaO miktarı ise yaklaşık %55,86 olarak belirlenmiştir.



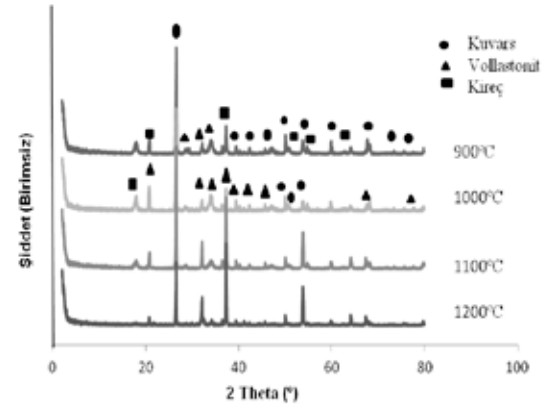
Kurutulan mermer tozu numunesi kuvars tozu numunesiyle beraber öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Öğütme işleminde Bilya/Karışım ağırlıkça oranı ve öğütme süresi başlıca değişkenler olarak seçilmiştir. Karışımlar değişik sürelerde öğütülerek en uygun vollastonit üretimi sağlayan öğütme koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Öğütme işlemi genelde sır hazırlamak üzere kullanılan ve bir tür Jet Değirmeni olan ~20mm çaplı porselen bilyalı ve 1000 cm<sup>3</sup> porselen kavanozlu Gabbrielli 2-B marka değirmende gerçekleştirilmiştir. Jet Değirmende öğütme ortamı olarak toplam 400 g 25 adet alumina porselen bilya kullanılmıştır. Öğütülmüş karışımların değişik sıcaklıklarda 900-1200 °C'de ve değişik sürelerde 30-300' süreyle kavurma çalışmaları için Nüve marka MF120 model kül fırını kullanılmıştır. Vollastonit katkılı seramik tabletlerin üretilmesi için; elde edilen öğütülmüş ve kavrulmuş malzemelerle yer karosu massesine vollastonit katkısının etkisini belirlemek üzere masse reçetesine % 0-20 oranlarında doğal ve yapay vollastonit eklenmiştir.

## 2.1. Bulgular ve Tartışma

Değişik stokiometrik oranlarda hazırlanan mermer tozu ve kuvars kumu karışımları, 20, 10, 5 gibi değişik bilya/karışım oranlarında değişik sürelerde öğütülmüştür. Örneklerin tanecik boylarını belirlemek üzere tane boyu dağılım analizleri yapılmış, bu amaçla Malvern marka Mastersizer 2000 model tane boyu analiz cihazı kullanılmıştır.

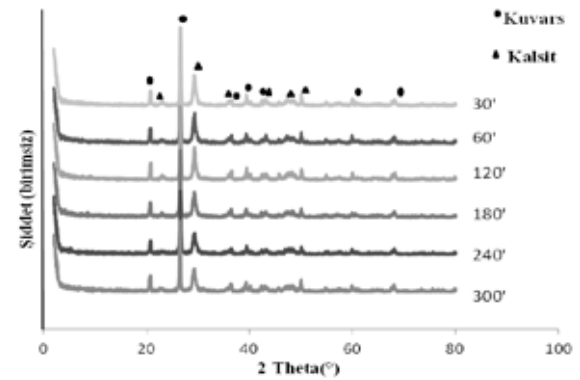
Tane boyu dağılım eğrilerindeki değişimler incelendiğinde, örneğin 180 dakika öğütülen karışımın %10'unun tane boyunun -1,7 µm, %50'sinin tane boyunun -23,3 µm, %90'ının tane boyunun ise -94,2 µm bulunmasıyla daha kısa sürelerdeki öğütmelerde bulunan d10, d50 ve d90 değerlerinden daha büyük tane boylarının ortaya çıktığı fark edilmiştir. 30' öğütme süresinde diğer sürelerde elde edilen değişimle tane boyu küçülmüş ancak daha uzun süre öğütmeye elde edilen dağılım eğrilerinde tane boyunun iri boylara doğru arttığı belirlenmiştir. Bu durum taramalı elektron mikroskobu görüntüleriyle de tespit edilmiştir. Söz konusu artışın; küçük tanelerin daha büyük tanelere bağlanması sonucu olduğu düşünülmektedir. Mineraller fazla öğütmeye maruz bırakıldıklarından d<sub>90</sub> eğrisinde dalgalanmalar görülmüştür. Bunun nedeni ise, spesifik yüzey alanının artışının yanında oluşan mekanik aktivasyondan dolayı sonraki prosesi etkileyecek olan kimyasal ya da fizikokimyasal dönüşümle-

re maruz kalmaları olduğu sonucuna varılmıştır. Öğütülmemiş karışım malzemeleri tepkimesi amacıyla ön testler yapılmış ve değişik sıcaklıklarda kavurma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde elde edilen ürünlere ait X-Ray Diffraction Analiz (XRD) desenleri Şekil 2'de verilmiştir.



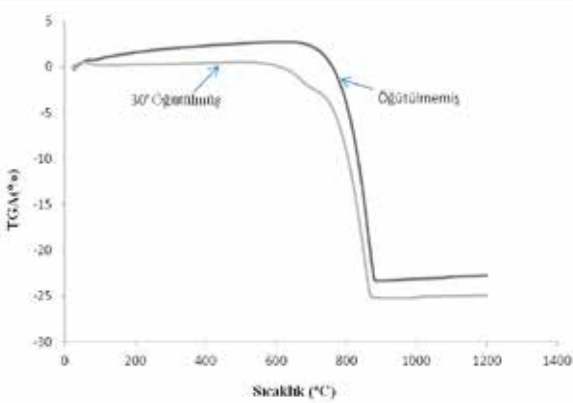
Şekil 2. Öğütülmemiş malzemenin kavurulmasıyla elde edilen ürünlerin XRD desenlerinin karşılaştırılması.

Buna göre 1000°C'de kavurma sonucu vollastonit kristalleri görülmeye başlanmış olup, kuvars ve kirece ait pikler belirgin bir şekilde izlenmektedir. Öğütülmemiş karışımın 1200 °C'de kavurulmasıyla elde edilen üründe ise vollastonitin yanında ayrıca kuvars ve kirecin de bulunduğu görülmektedir. Öğütülmemiş karışım 1100°C'de kavurulmasına rağmen, her ne kadar XRD analizinde görülmeseyse de, önemli miktarda kalsiyum karbonat ve kireç içermektedir. CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 1/1,1 olan ve Bilya/Karışım oranı 20 olan mermer tozu ve kuvars tozunda hazırlanan karışım çeşitli sürelerde öğütülmüştür. Elde edilen ürünün XRD desenleri ise Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. CaO/SiO<sub>2</sub> oranı=1/1,1 olan ve Bilya/Karışım oranı 20 olan mermer tozu ve kuvars tozunda hazırlanan, çeşitli sürelerde öğütülmüş karışımların XRD desenleri.

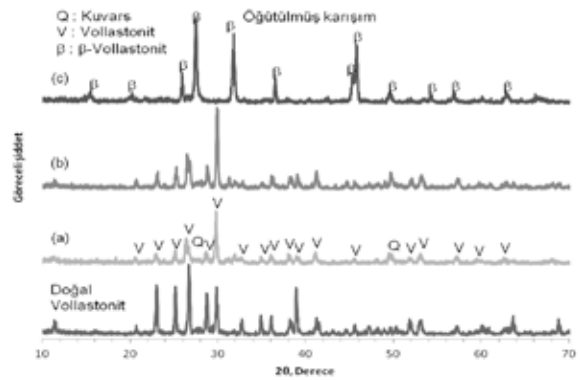
XRD desenlerinden de anlaşılacağı gibi 30' sürenin mekanik aktivasyon için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Öğütülmüş karışımın XRD desenlerinde kalsiyum karbonata ait piklerin genişliklerinde belirgin şekilde bir genişlemenin ve pik şiddetlerinde ise kısılmaların olduğu gözlenmiştir. Öğütme işleminin kalsiyum karbonatın kristal yapısını bozarak amorflaşmasına yol açtığı sonucuna varılmıştır. CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 1/1,1 olan öğütülmemiş karışımın Termogravimetrik Analiz'i (TGA) ve Bilya/Karışım oranı 20 olan, 30' süre ile öğütülmüş malzemenin TGA analizi yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. CaO/SiO<sub>2</sub> oranı=1/1,1 olan öğütülmemiş karışımın ve Bilya/Karışım oranı 20 olan 30' süre ile öğütülmüş malzemenin TGA grafiği.

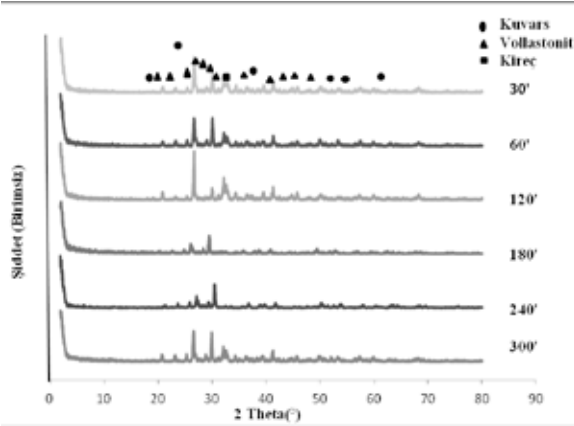
TGA analizi sonucunda öğütülmemiş karışım ve 30' öğütülmüş karışım kütle kaybı ya da kalsinasyon sıcaklığında belirgin bir değişimin olduğu belirlenmiştir. Bu değişim, öğütülmüş karışımındaki karbonatın daha düşük sıcaklıklarda parçalanması şeklinde ortaya çıkmıştır. Böylece, öğütmenin vollastonitin oluşum sıcaklığını düşürmek üzere bir aktivasyona yol açtığı ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra kalsinasyon çalışmaları yapılmıştır. Numunelerinin 1000°C'de 30- 300' süre ile kalsinasyonu sonucu elde edilen ürünlerin Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizleri yapılmıştır. CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 1/1,1 ve Bilya/Karışım oranı 20 olan 30' süreyle öğütülmüş ve 1000°C'de 30' kalsine olmuş örnekler için SEM görüntüsünde vollastonite dönüşmüş numunelerin yanında çok az miktarda kireçte gözlenmiştir. Bilya/Karışım oranı 20 olan mermer tozu ve kuvars tozu karışımlarından hazırlanan ve 30' süre ile öğütülmüş karışımın 1000°C de 30' kavrulmasıyla elde edilen üründe çok az miktarda kireç bulunmaktadır. Ancak elde edilen ürünün vollastonit olduğu belirlenmiştir. Öğütülmemiş karışımların 1000°C'de kavrulmaları sonucu elde edilen

ürünlerin SEM görüntülerinde kuvarsin olduğu gibi durduğu, sadece mermer tozunun kalsine olarak üzüm salkımı şeklinde topaklandığı anlaşılmaktadır. Oysa 30' öğütülmüş karışımının 1000°C'de kavrulması ile elde edilen ürünün SEM görüntüsünde, mermer tozu ya da kireç ve kuvars tozu görülmemekte, gözenekli yapıdaki vollastonit tanecikleri gözlenmektedir. CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 1/1,1 olacak biçimde hazırlanan mermer tozu ve kuvars tozu karışımının 300' öğütülmesinden sonra 1000, 1100 ve 1200°C'de 300' süreyle kavrulması sonucu elde edilen ürünlerin ve doğal vollastonitin XRD desenleri Şekil 5'de karşılaştırılmaktadır. Öğütülmüş karışımın 1000°C de 300' süreyle kavrulması sonucu elde edilen üründe kireç bulunmamaktadır. Ürün, vollastonittir (Şekil 5.a). 1100°C'de kavurmayla elde edilen ürün ise 1000°C'de elde edilenle benzer içeriğe sahip olmakla birlikte daha fazla kristal yapıya vollastonit içermektedir (Şekil 5.b). 1200°C'de elde edilen ürün, önceki iki üründen tamamıyla farklı olarak vollastonitin yüksek sıcaklık fazı olan ve psödo-vollastonit de denilen β -vollastonit içermektedir (Şekil 5.c).



Şekil 5. 1000 (a), 1100 (b) ve 1200 (c) °C'de 300' kavruulan CaO/SiO<sub>2</sub> oranı =1/1,1 olan ve Bilya/Karışım ağırlıkça oranı 10 olan öğütme ortamında 300' öğütülmüş malzemelerin ve doğal vollastonitin XRD desenlerinin karşılaştırılması.

Öğütülmüş malzemelerin 1000°C'de kavrulması sonucu vollastonit kristalleri görülmeye başlandığı için CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 1/1,1 olan ve Bilya/Karışım ağırlıkça oranı 20 olan öğütme ortamında 30' öğütülmüş örneklerinin 1000 °C de çeşitli sürelerde (30-300') kavrulmasıyla elde edilen ürünlerin XRD analizleri yapılmış ve Şekil 6'da verilmiştir.



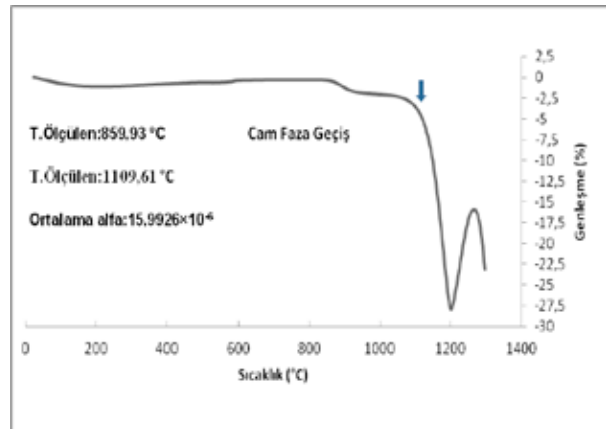
Şekil 6. CaO/SiO<sub>2</sub> oranı =1/1,1 olan ve Bilya/Karışım ağırlıkça oranı 20 olan mermer tozu ve kuvars tozu karışımlarından hazırlanan ve 30' öğütülmüş örneklerinin 1000°C'de farklı sürelerde kavrulmasıyla elde edilen ürünlerin XRD desenleri.

CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 1/1,1 olan ve Bilya/Karışım ağırlıkça oranı 20 olan mermer tozu ve kuvars tozundan hazırlanan karışımların 30' öğütülmesi ve 1000°C'de 30' kavrulması sonucu elde edilen ürünlerin XRD desenleri karşılaştırılmış ve 60' da değirmenden alınan malzeme miktarı maksimum düzeyde olduğundan elde edilen ürünler seramik tabletlerin üretilme koşullarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Vollaistonitsiz karışım, doğal vollaistonitli karışım, öğütülmemiş karışım, öğütülmüş ve kavrulmuş karışımlardan elde edilen numuneler yer karosu massesiyle %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Denver marka bilyalı değirmende ~ 30' süre ile karıştırılarak seramik tabletleri üretmek üzere seramik çamurları elde edilmiştir. 5 farklı çamur 5×5×1cm boyutlarında hazırlanan alçı kalıplara dökülmüş ve toplam 15 adet tablet elde edilmiştir. Ayrıca, yapay vollaistonitin katkısını ortaya çıkarmak üzere pişme sıcaklığı denemeleri yapılmıştır ve pişme denemeleri bittikten sonra sır denemesi için bir yüzleri sırlanarak 1200°C'de 1 saat süre bekletilmiştir.

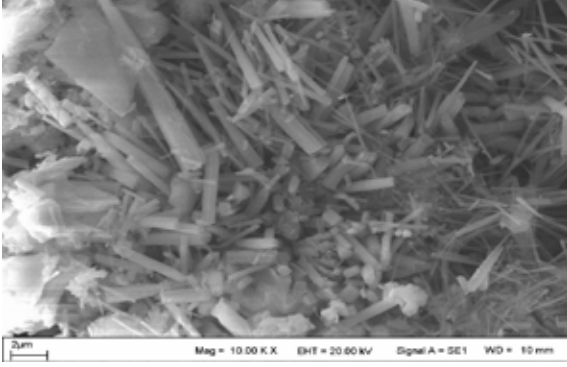
Boncuklanmanın görülmediği, kalın ve ince yerlerde çatlamaya rastlanmadığı, beyazlığının iyi, 1200°C'de pişen tabletlerin tını seslerinin oldukça ince ve porselenliğe oldukça yakın olduğu sonuçlarına varılmıştır. Ayrıca farklı derecelerde pişen bütün malzemeler 1200°C pişen malzemelerle aynı özellik göstermiştir. Karışımda ağırlıkça % 5-20 oranında CaO/SiO<sub>2</sub> oranı=1/1,1 ve Bilya/Karışım ağırlıkça oranı 20 olan öğütme ortamında 30' öğütülmüş ve 1000°C'de 30' kavrulmuş malzeme bulunan seramik çamurunun 1000, 1100 ve 1200°C pişirilmesiyle elde

edilen seramik ürüne ait asit ve baza dayanım test sonuçlarına bakıldığında 1200°C'de pişirilen ürünlerin aside ve baza dayanımlarının oldukça iyi olduğu sonucuna varılmıştır. TS EN 1071-6 standartlarına göre yapılan testlerde; orijinal yüzeyde kısmen ve tamamen bozunma görülmemektedir. Tane boyutu incelidikçe oluşturulan tabletlerin pişme sonrası küçülme değerleri artmakta, su emme değerleri ise düşmektedir. Karışımda ağırlıkça % 5-20 oranında CaO/SiO<sub>2</sub> oranı=1/1,1 ve Bilya/Karışım ağırlıkça oranı 20 olan öğütme ortamında 30' öğütülmüş ve 1000°C'de 30' kavrulmuş malzeme bulunan seramik çamurunun 1000, 1100 ve 1200°C'de pişirilmesiyle elde edilen seramik ürüne ait % pişme küçülmesi test sonuçları karşılaştırıldığında, pişme sıcaklığı arttıkça pişme küçülmesinde de artış olduğu görüldü.

En fazla küçülmenin %10 yapay vollaistonit katkılı seramik ürünün 1200°C'de pişirilmesiyle elde edilen seramik ürüne ait olup %53,75 olduğu görülmüştür. Yapılan dilatometre analizlerine bakıldığında (Şekil 7) hangi malzemenin tana değeri büyük olan malzemenin gösterdiği genişlemenin de büyük olduğu anlaşılmaktadır. Ok ile gösterilen nokta sinterleme sıcaklığını vermektedir. En üst cam faza geçiş sıcaklığı 700°C olmakla birlikte; sıcaklığa en dayanıklı numune olduğu sonucuna varılmaktadır. Bünyelerin göstermiş oldukları çekme davranışları pişme küçülmesi davranışlarını desteklemektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda benzer davranışlar gözlemlenmiştir (Salem vd, 2009- Orts vd, 1998).



Şekil 7. Karışımda ağırlıkça %5 oranında CaO/SiO<sub>2</sub> oranı =1/1,1 olan ve Bilya/Karışım ağırlıkça oranı 20 olan öğütme ortamında 30' öğütülmüş ve 1000°C'de 30' kavrulmuş malzeme bulunan çamurdan elde edilen seramik tablete ait dilatometre analiz sonuçları.



Şekil 8. %20 oranında 1000°C'de pişirilen öğütülmüş vollastonitli seramik tabletinin SEM görüntüleri.

Elde edilen SEM görüntüleri ve XRD sonuçlarında (Şekil 8) kılcal yapıdaki mullit minerallerine ve vollastonit minerallerine yer yer rastlanmıştır. XRD'ler de rastlanan Mullit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) mineralleri refrakter ve porselen ürünlerde özellikle istenilen bir fazdır. Mullitin yer karolarında kullanım alanına sahip olmasının nedeni sahip olduğu üstün fiziksel özellikler olup, seramik malzeme de pişme sonrası direnci arttırmaktadır.

### 3. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen çalışmalarla aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. CaO/SiO<sub>2</sub> (mol/mol) oranı 1/1,1 olacak şekilde hazırlanan mermer tozu-kuars tozu karışımı Bilya/Karışım ağırlıkça oranı 20 olan öğütme koşullarında 30' öğütüldüğünde ve öğütülen bu karışım kavruşduğunda, 1000°C'de elde edilen üründe, aynı oranlarda malzemeler içeren öğütülmemiş karışımın kavruşmasıyla elde edilen üründe ise ancak 1200°C'de ortaya çıkan, vollastonit izine rastlanmıştır. Böylece öğütülmüş karışım kullanılarak daha düşük sıcaklıklarda vollastonit üretilbileceği sonucuna varılmıştır.
2. Elde edilen seramik malzemelere çeşitli seramik testlerinin uygulanması sonucunda; mekanik aktivasyona uğramış karışımlarla elde edilen vollastonitin seramik malzeme de camsı fazın oluşum sıcaklığını düşürdüğü belirlenmiştir.
3. Dilatometre analizleriyle elde edilen bulgulara göre, en üst cam faza geçiş sıcaklığı 700°C olmakla birlikte; öğütülmüş karışımın kavruşmasıyla elde edilen vollastonitin ağırlıkça %5 olarak bulunduğu seramik ürünün sıcaklığa en dayanıklı malzeme olduğu belirlenmiştir.
4. Daha düşük sıcaklıklarda üretilen vollastonitin daha düşük sıcaklıklarda camlaşmaya izin ver-

mesi sayesinde, endüstriyel boyutta üretilen yer karosu graniti için üretim sırasındaki enerji maliyetinin düşük olacağı anlaşılmıştır.

### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi tarafından (BAPB Proje 2012/14) desteklenmiştir.

### KAYNAKLAR

- Anon, Türk Standardı, TS EN 1071-6 :2007, İleri Teknoloji Seramikleri-Seramik Kaplamalar için Deney Metotları- Bölüm6 :Mikro-Aşınma Deneyi ile Aşınma Dayanımının Tayini, <http://www.tse.org.tr/>
- Baláz P., 2000, "Extractive Metallurgy of Activated Minerals", Elsevier, Science B.V., Amsterdam.
- Boldyrev, V.V., 2004, "Ten years after the first international conference on mechanochemistry and mechanical alloying; where we are now?", J. Mater. Sci., 39, 4985-4986.
- Göktaş, M., 2013, "Mermer Sanayi Atıklarından Yapay Kalsiyum Silikat Üretiminde Aşırı Öğütmenin Etkilerinin Seramik Malzemeler Üzerinde Araştırılması", İnönü Üniversitesi, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi.
- Kingery, W.D., Bowen, H.K. ve Uhlmann, D.R., 1975, Introduction to Ceramics, Wiley Series of Science and Technology of Materials.
- Orts, M.J., Escardino, A., Amoros, J.L. ve Negre, F., 1998, "Microstructural changes during the firing of stoneware floor tile," Appl. Clay Sci., 8, 193-205.
- Salem, A., Jazayeri, S. H., Rastelli, E. ve Timellini, G., 2009, "Dilatometric study of shrinkage during sintering process for porcelain stoneware body in presence of nepheline syenite", J. Mat. Process. Tech., 209, 1240-1246.
- Wang, Y., Forssberg, E., 2007, Enhancement of energy efficiency for mechanical production of fine and ultra-fine particles in comminution, China Particology, 5, 193-201.