

*Kaya Mekanığı*



## Zonguldak Taşkömür Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Aşındırıcılık Özelliklerinin Araştırılması

O. Yaralı

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak Türkiye

**ÖZET:** Bu çalışmada, Zonguldak Taşkömür Havzası kömür çevre kayaçlarının aşındırıcılık ve mekanik özelliklerini belirlemek için laboratuvarında bir dizi deney yapılmıştır. Kayaçların aşındırıcılık özellikleri, Cerchar ve Schimazek aşınma indeks yöntemleri kullanılarak bulunmuştur. Cerchar aşınma indeksinin bulunabilmesi için bir deney düzeneği kurulmuştur. Schimazek aşınma indeksini bulmak için örneklerin ince kesitleri mikroskopta incelenmiştir. Sonuçta, kayaç örneklerinin mekanik, petrografik ve aşındırıcılık özellikleri karşılaştırılmıştır.

**ABSTRACT:** In this study, in order to determine abrasivity and mechanical properties of coal measures rocks in Zonguldak Hard Coal Basin, numerous tests by using different testing methods have been carried out in the laboratories. Abrasivity properties of rocks have been found by using Cerchar and Schimazek abrasivity index methods. A special device for Cerchar abrasivity experiment has been established. Microscopic studies of thin slices specimens are made to find out Schimazek abrasivity index. Finally, a comparison between mechanical, petrographical and abrasivity properties is made.

### I GİRİŞ

Aşınma, kazı esnasında kayaçların keskinlik tarafından koparılması sırasında meydana gelmektedir. Yüksek aşındırıcı özelliğe sahip kayaçlar, kısa zamanda keskinliğin körlenmesine neden olmaktadır. Bu durum, bir yandan keski tüketimini artırmakta, diğer yandan kazı verimliliğini düşürmekte ve dolayısıyla kazı maliyetinin artmasına yol açmaktadır. Kazı makineleri ile galeri sürmede, birim miktar kayaç kazısı için tüketilen keski sayısı, kazı işinin ekonomik olup olmayacağı hakkında en önemli kistastır.

Bir kaya kütlelerinin aşındırıcılığı aşağıda belirtilen faktörlerin bir kombinasyonu şeklinde gerçekleşmektedir (Tanirock 1999). Bunlar,

- Kayaçın dayanımı ve sertliği,
- Keskinin kesme derinliği ve kesme hızı,
- Keskinlerin oluşturdukları darbe yüklen,
- Kesme tipi veya keskinin hareket şekli
- bükün kesme veya ufalanma,
- Keskinin kalitesi.

- Mineral bileşimi, mineral tanelerinin boyutu ve sertliğidir.

Yukarıda sayılanların dışında, kayaç özellikleri ile ilgili aşınmayı etkileyen parametreler olarak da kayaçtaki kuvars ve diğer aşındırıcı minerallerin miktarı ile bunların ortalama tane boyutu ve kayacın çimleniş derecesi de önemli olmaktadır. Söz konusu parametrelerin ölçülmesi arttıkça, keski aşınması da o oranda artmaktadır (Schimazek & Knatz 1970).

Zonguldak taşkömür Havzası kömür çevre kayaçlarının kazılabilirliği, delinilebilirliği, keskinin aşındırıcılığı ve aşındırıcılığı konularında daha önceki yıllarda araştırmalar ve projeler yapılmıştır. Ancak, Havza'ya yönelik kömür çevre kayaçlarının aşındırıcılığı konusunda özellikle Cerchar aşınma indeksi (CAI) deney aleti kullanılarak yapılmış araştırma sayısı sınırlı kalmıştır (Cennan 1988, Avcı 2001, Erdaş 2002, Erdaş 2002, Kel 2003). Bu araştırmalarda sınırlı sayıda kayaç üzerinde Cerchar aşınma indeksi deney aleti kullanılarak kayaçların aşındırıcılıkları belirlenmiştir. Ancak yapılan bu

çalışmalarda Avcı (2001) hariç kayaçların petrografik özellikleri gözönüne alınmamıştır.

Bu çalışmada, kömür çevre kayaçlarının Schimazek ve Cerchar aşınma indekslerine göre aşındırıcılık özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Türkiye Taş kömürleri Kurumu (TTK)'na bağlı değişik Müesseselerden 31 farklı kömür çevre kayacı (ince taneli, orta taneli, iri taneli kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı, konglomera) alınmıştır (Çiz. 1). Bu kayaç örnekleri üzerinde laboratuvarda lek eksenli basınç ve dolaylı çekme (Brazilian) dayanım deneyleri ile hazırlanan prizmatik şeklindeki düzgün numuneler üzerinde Cerchar aşınma indeks deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, Cerchar aşınma indeksine bağlı olarak tahmini keski tüketim miktarları da belirlenmiştir. Kayaçların petrografik analiz sonuçlarına bağlı Schimazek aşınma indeksleri bulunmuştur. Bu iki aşındırıcılık indeksi arasındaki ilişkiler de araştırılmıştır.

## 2 CERCHAR AŞINMA İNDKKSİ

Kayaçların aşındırıcılıklarının belirlenmesine yönelik bir çok deney yöntemi önerilmiş olmasına rağmen kabul görmüş deney yöntemi oldukça az sayıdadır. Son yıllarda Cerchar aşınma indeksi (CAİ) deneyi bir projede keskinin aşınmalarının ve keski değişim maliyetlerinin doğru tahmin edilmesinde ekonomik öneminden dolayı dikkate değer bir önem kazanmıştır (Atkinson 1993). Cerchar aşınma indeksi deneyi özellikle Batı Avrupa'daki kaya mekaniği laboratuvarlarında sert kayaçların aşındırıcılıklarının belirlenmesinde oldukça yaygın kullanılan bir deney yöntemidir (Plinninger et alı. 2003).

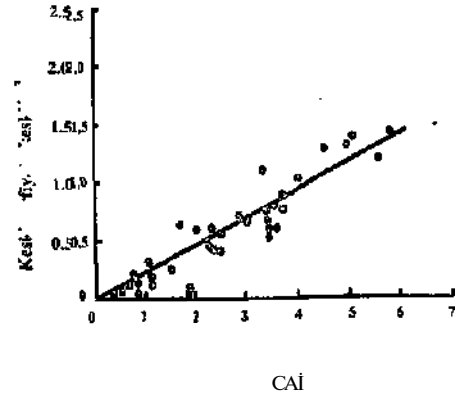
Cerchar Aşınma indeksi deneyi ilk olarak Fransa'da Cerchar Araştırma Enstitüsü'nde (Research Institute Cerchar of the Charbonnages de France) 1971 yılında bulunmuş ve sonuçlar Valaniin (1973) tarafından yayımlanmıştır. Bu deney yöntemi keski aşınması ve sarfiyatının tespiti için kullanılmaktadır (Tanırock'dan 1999).

Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (International Society of Rock Mechanics). 3 Eylül 1987 yılında Montreal'de yaptığı toplantıda kaya mekaniğinde kayaçların kesilebilirliği, delinebilirliği ve ka/ılabilirliği konularında Cerchar aşınma ve Cerchar sertlik indeks deneylerinin standart kaya mekaniği deneyi olarak uygulanmasını önermiştir (ISRM 19X7; Bilinn'den 1989).

West (1981,1986,19X9), kömür içeren sedimanter kayaçları kullanarak yaptığı çalışmalar sonucunda. Cerchar aşındırıcılık indeksi ile ifade edilen kayaç aşındırıcılığının kayacın kuvars içeriği ve Mobs'

sertlik ölçütü ile doğru orantılı olduğunu bildirmiştir. Bununla birlikte, McFeat-Smith & Fowell (1977), kayacın kuvars içeriğinin, kesici uç tüketimi açısından kayaç aşındırıcılığını tek başına ifade edemeyeceğini bildirmiştir. Kumtaşlarında galeri açma makineleri ile yapılan kazılarda, kesici uç tüketiminin kuvars içeriğinden çok çimentolaşma derecesi ile ilişkili olduğu belirlenmiştir (Barbour & Atkinson & Ko 1979).

Johson & Fowell (1986) yerinde yaptıkları ölçmelerle keski sarfiyatının, kayaçların Cerchar aşınma indeksleriyle (CAİ) doğrudan ilişki içerisinde olduğunu göstermişlerdir (Tunçdemir'den 2002). Bu JU-L; Sekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. CAİ İle keski sarfiyatı arasındaki ilişki (Johson & Fowell 1986 ;Tunçdemir,2002).

Al-Ameen & Waller ( 1979), yaptıkları çalışmada, az miktarda aşındırıcı mineraller içeren yüksek dayanımlı bazı kayaçların yüksek aşındırıcılık indeksine sahip olabildiklerini belirlemişlerdir. Diğer taraftan, çok yüksek aşındırıcı mineral içeriğine sahip olan bazı düşük dayanımlı kayaçların, düşük aşındırıcılık indeksine sahip olabildikleri de görülmüştür. Araştırmacılar, kayaçların aşındırıcı mineral içeriklerinin ve çimentolaşma özelliğinin, Cerchar aşındırıcılık indeksi üzerinde birlikte bir etkisinin söz konusu olduğunu bildirmişlerdir.

Çizelge 1. Örnek alım yerleri.

No	Örneklerin Alındığı Müessesesi	Yer	Örnek Adı
1	Üzülmez Müessesesi	-170/505 Desandre	İri taneli kumlası
2	Üzülmez Müessesesi	-205 Doğu Lağ. B14 kredili	İri taneli kumtaşı
3	Üzülmez Müessesesi	-170 Acun Geçiş 3,5 Kuzey Lağ.	İnce taneli kumtaşı
4	Üzülmez Müessesesi	+56 Kurul Doğu Lağımı	İnce taneli kumtaşı
5	Üzülmez Müessesesi	-170 Sulu Tv. Taşı Güney Kanadı	İnce Taneli Kumtaşı
6	Üzülmez Müessesesi	-170 Acun Batı Tv. 4. Kuzey Lağ.	Silttaşı
7	Üzülmez Müessesesi	-170 Sulu Tv. Taşı Güney Kanadı	Silttaşı
8	Üzülmez Müessesesi	-170 NasifoğluTb. Taşı Kuzey	Silttaşı
9	Üzülmez Müessesesi	-156 Sulu Doğu Taban 2. Güney	Silttaşı
10	Üzülmez Müessesesi	-250 Kuzey Lağımı	Çamurtaşı
11	Üzülmez Müessesesi	-170NasifoğluTv. Taşı	Çamurtaşı
12	Karadon Müessesesi	-460/41405 Gelik Kuzey Lağımı	İnce taneli kumtaşı
13	Karadon Müessesesi	-460 Gelik Güney Lağımı	İnce taneli kumtaşı
14	Karadon Müessesesi	-360 Gelik Hazırlık Galerisi	Orta Taneli Kumtaşı
15	Karadon Müessesesi	-360 Sulu Tb.	Orta Taneli Kumtaşı
16	Karadon Müessesesi	-460/42510 Kuzey Lağımı	İnce Taneli Kumtaşı
17	Karadon Müessesesi	-360 Gelik Hazırlık Galerisi	Silttaşı
18	Kozlu Müessesesi	-560/112056361 Lağımı	İri Taneli Kumtaşı
19	Kozlu Müessesesi	-560/112056361 Lağımı	Konglomera
20	Kozlu Müessesesi	-560/112056360 Lağımı	Orta Taneli Kumtaşı
21	Kozlu Müessesesi	-560/112056359 Lağımı	Orta Taneli Kumtaşı
22	Kozlu Müessesesi	-560/112056357 Lağımı	İnce Taneli Kumtaşı
23	Kozlu Müessesesi	-560/112056361 Lağımı	İnce Taneli Kumtaşı
24	Kozlu Müessesesi	-560/112056361 Lağımı	İnce Taneli Kumtaşı
25	Amasra Müessesesi	-250/2. Bedesten Hazırlık Lağımı	Konglomera
26	Amasra Müessesesi	-250 Taşlı Damar Üst Tb. Yolu	Silttaşı
27	Amasra Müessesesi	-250 Taşlı Damar Alt Tb. Yolu	Silttaşı
28	Ozbeyler Madencilik	Gelik Ocağı	İnce taneli kumtaşı
29	Ozbeyler Madencilik	Gelik Ocağı	İnce taneli kumtaşı
30	Ozbeyler Madencilik	Gelik Ocağı	Silttaşı
31	Ozbeyler Madencilik	Gelik Ocağı	Silttaşı

Şuana & Peters (1982), tek mineralli ve büyük tek kristalli kayalar üzerinde Cerchar aşınma indeks deneyleri yapmışlardır. Kuvars mineralinin çok aşındırıcı olduğundan aşındırıcılığı % 100 kabul

etmişler ve Cerchar aşınma indeksine 6.0 (= % 100 kuvars denkliği) olarak karşılık geldiğini belirtmişlerdir,

Cerchar aşınma indeks deneyi ; 160 kg/mm çekme dayanımı olan 90° tepe açılı konik bir uç 7 kg bastırma kuvveti ile gayri muntazam örnek üzerinde yaklaşık bir saniye sürede 1 cm çekilmekle ve uça oluşan aşındırma yüzeyi kayaç örneğinin aşındırıcılığı vermektedir. Konik uç. En 24-25 çeliğinden 610 ± 5 Vickers sertliğinde olmalıdır. Konik uç mikroskop altında incelenerek ucun yüzey çapındaki aşınması 1/10 mm hassasiyetinde ölçülür. Her 1/10 mm'ye karşılık gelen aşınma değeri 1 Cerchar aşınma indeksi değeri olarak belirlenir. Belirlenen aşınma miktarı kayacın Cerchar aşındırıcılığı olarak kabul edilir (Evenden 1983).

Cerchar aşınma indeksi değeri 0 dan 6 arasında değişmektedir. Çizelge 2'de Cerchar aşınma indeksine göre aşındırıcılık sınıflaması verilmiştir.

Çizelge 2. Aşındırıcılık sınıflaması (Cerchar 1986; Thuro&Plinninger'dan 1998).

CAI	Sınıfı
<0.5	çok az aşındırıcı
0.5- 1,0	hafif aşındırıcı
1.0-2,0	aşındırıcı
2.0-4.0	çok aşındırıcı
>4.0	oldukça fazla aşındırıcı

### 3 SCHİM AZEK AŞINMA İNDEKSİ

Schimazek aşınma indeksi (F) bir disk keski kullanılarak sedimanter kayaçlar üzerinde yapılan aşınma deneyleri sonucunda bulunmuştur (Schimazek & Knatz 1970).

Kayaçların çekme dayanımı ve petrografik özelliklerinden yararlanarak aşınma numuneleri St 50 çeliğinden imal edilmiş, uçları konik, 90°, 0.3 mm'ye kadar köreltilmiş keskiyle ve 45 N'luk baskı kuvvetiyle 16 m Archimed Spirali ile çizilir. Uçlarda meydana gelen ağırlık kaybı aşınma indeksinin fonksiyonu olarak kabul edilmektedir.

Aşınma indeksi, numunelerin çekme dayanımı ve petrografik özelliklerinden elde edilir. Kayaçtaki kuvars ve diğer aşındırıcı minerallerin miktarı, bunların boyutları ve kayacın çekme dayanımı arttıkça aşınma da artacağına göre, aşınma indeksi bu parametrelerin çarpımıyla Eşitlik 1'den elde edilmektedir.

$$F = Q * d * \sigma, \quad (D)$$

Burada;

F = Schimazek aşınma indeksi, N/mm

246

Q = Eşdeğer kuvars yüzdesi, %

d = Ortalama tane boyutu, mm

$\sigma$ , = Dolaylı çekme dayanımı, MPa

Sert keskiyle yapılan mekanize kazıda, Schimazek aşınma indeksi 0.5 N/mm'nin üzerinde olan kayaçlar çok aşındırıcı olduklarından kesilemezler. Ancak, arında çok çatlak ve kırığın var olması durumunda, bu kazılabilirlik kriterinin i N/mm'ye kadar çıkması mümkündür. Ayrıca, disk tipi keskiyle yapılan kazıda Schimazek aşınma indeksi değeri 2.7 N/mm'ye kadar olan kayaçların kazısının yapılabileceği de saptanmıştır (Schimazek & Knatz 1970).

F, aşınma indeksi orta Avrupa'da çok ince taneli ve poroziteli sedimanter kayaçlarda başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak, F aşınma İndeksinde kalın taneli, metamorfik ve magmatik kayaçlarda oldukça yüksek hatalı sonuçlara varılmıştır. F aşınma indeksi Ewendl (1989) tarafından geliştirilmiştir (Tamrock'dan 1999).

Ewendt (1989), Schimazek aşınma indeksi değerleriyle disk kesme deneylerinden elde ettiği sonuçları korelasyon yaparak Schimazek aşınma indeksini düzenlemiştir. Eşitlik 2'de geliştirilmiş Schimazek aşınma indeksinin bağıntısı verilmektedir (Deketh'den 1995).

$$F_{ms} = Q * I_{s(50)} * \sqrt{d} > 1 \text{ mm} \quad (2)$$

Burada;

$F_{ms}$  = Geliştirilmiş Schimazek aşınma indeksi, N/mm

$I_{s(50)}$  = Nokta yük dayanımı, MPa

Ewendt (1989) Almanya'da Saar Kömür Havzası'nda yaptığı aşınma deneyleri sonucunda F ile CAI arasında Eşitlik 3'deki gibi bir ilişki bulmuştur (Tamrock'dan 1999).

$$CAI = 0.6 + 3.32 F \quad (3)$$

### 4 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada, Zonguldak Taşkömür Havzası kömür çevre kayaçları Cerchar aşınma indeksi deneyleri ile petrografik analiz sonuçları verilmiştir. Gerek örneklerin alınmasında gerekse laboratuvar deneylerinin yapılmasında Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (international Society of Rock Mechanics) (ISRM, 1980) standartlarına uyulmuştur.

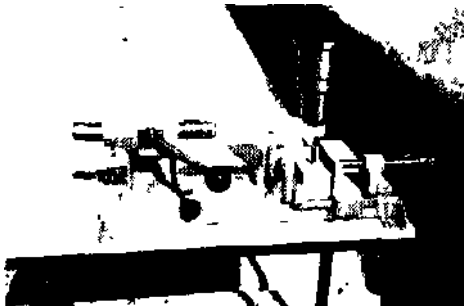
Dayanım deneylerinde "NX" (= 54 mm) çapında karol örnekten üzerinde çalışılmıştır. Dayanım ve indeks deneylerinde standartlara uygun olmayacak şekilde kırılan örnekler göz önüne alınmamıştır. Ayrıca, deneylerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde, verilerin birbirine olan uyumlarına istatistiksel olarak da bakılmıştır. Bunun için Chauvenet ölçütü uygulanmıştır (Holman & Gajda, 1984).

Kömür çevre kayaların aşındırıcılıklarını belirlemek için geliştirilen Cerchar indeks deney aleti kullanılmıştır (Şek. 2) Bu deneyde kullanılan örnekler, elmas emprenyeli sulu taş kesme mafcasında prizmatik şekilde hazırlanmıştır. Deneylerde, orijinal deney yönteminde önerilen çelik kalitesinde konik uçlar kullanılmıştır (Şek 3).

Kayaç örnekleri üzerindeki çizme işlemi, her defasında yeni bir ucla farklı yönlerde 5 kez tekrarlanarak yapılmıştır. Konik uçların uç kısımlarında oluşan aşınma yüzeyinin çapı ışık yansımali 25X büyütmeli mikrometre ölçekli binokuler mikroskop altında ölçülmüştür. 1/10 mm'lik aşınma yüzeyi bir birim Cerchar aşınma indeksi olarak kabul edilmiştir. Böylece, kayalara ait Cerchar aşınma indeksi değeri 5 çizimin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4'de mikroskop altında aşınmış bir ucun görünümü verilmiştir.

İncelenen kömür çevre kayaların petrografik analizlerinde; aşındırıcı mineral bileşimlerine, ortalama kuvars tane boyutlarına bakılmıştır.

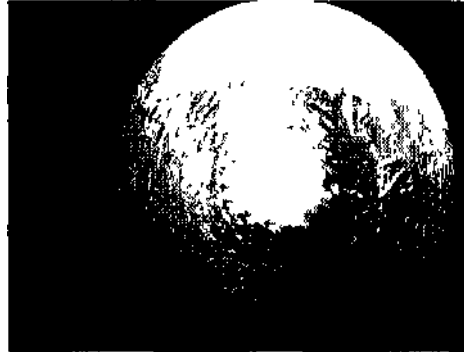
Laboratuvar da kayaların tek eksenli basınç (o<sub>1</sub>), dolaylı çekme (o<sub>2</sub>) dayanımları ile Cerchar aşınma indeks deneylen yapılmıştır. Deney sonuçları ile petrografik tanımlamalara bağlı olarak Eşitlik I kullanılarak hesaplanan Schimazek aşınma indeks değeri hesaplanmıştır



Şekil 2 Cerchar aşınma indeks deney aleti.



Şekil 3 Konik uçlar



Şekil 4. Mikroskop altında aşınmış bir ucun görünüşü.

Çizelge 3'de incelenen kayaların laboratuvar deney sonuçları, Çizelge 4'de ise Cerchar aşınma indeks deney sonuçları, ile Şekil 1'den bulunan m<sup>3</sup> başına keski tüketimleri ile aşınma indekslerinin aşındırıcılık sınıflamaları verilmiştir.

Çizelge 3. İncelenen kayaçların laboratuvar deney sonuçları. Çizelge 4. İncelenen kayaçların CAI ve F değerleri ile aşındırıcılık sınıflamaları.

No	$f_{rc}$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	Q %	$\theta$ (%)	d (mm)
1	85.54±7.19	7.93±0.72	75	75.09	0.58
2	77.45±11.52	6.29±0.67	80	81.69	0.78
3	87.36±20.76	8.71±1.40	70	70.40	0.36
4	77.05±3.02	6.28 ±0.91	60	60.70	0.33
5	116.20±16.4	8.60±1.10	55	56.01	0.3B
6	61.51 ±22.76	8.63±1.76	70	70.33	0.15
7	73.20±9.2	8.20 ±0.40	30	31.02	0.10
8	70.10±11.8	7.30±0.50	40	44.25	0.15
9	62.50±6.86	7.18±0.82	50	52.80	0.05
10	44.65±11.62	5.89±2.65	10	10.00	0.065
11	47.81 ±9.10	5.45±2.10	10	10.00	0.065
12	123.21±13.6	7.42±0.90	75	75.45	0.52
13	103.40±12.1	6.74±1.18	70	71.03	0.54
14	89.79±9.16	9.24±1.22	65	65.12	0.40
15	78.65±7.26	7.84±0.86	45	51.90	0.40
16	128.40±18.2	10.60±0.40	85	85.23	0.75
17	83.20±9.7	7.20±1.00	40	41.45	0.063
18	76.33±5.36	8.32±1.08	80	80.35	0.92
19	34.84 ± 2.72	5.92±1.48	-	-	-
20	56.93±1.64	5.73±0.91	65	68.60	0.40
21	96.40±10.5	8.20±0.52	65	68.47	0.42
22	126.60±14.7	10.80±0.40	55	58.70	0.60
23	66.92±10.6	8.70±1.04	50	53.72	0.55
24	98.64±9.21	9.86±1.54	70	71.95	0.58
25	30.42 ±4.82	5.21±1.20	-	-	-
26	58.31±3.12	7.03±1.36	40	42.45	0.05
27	64.81±6.78	6.84±1.64	45	49.13	0.09
28	72.14±6.16	6.21 ±0.63	40	42.29	0.26
29	85.56±8.41	8.32±0.46	80	81.75	0.75
30	56.37±3.12	6.05±1.05	45	49.05	0.075
31	58.72±5.83	5.65±1.20	50	53.52	0.09

e	OrLCAI	Keski Sarfiyatı	Aşındırıcılık Sınıfı (CAI)	F (N/mm)	Aşındırıcılık Sınıfı {F> 0.5-1 N/mm}
1	2.45	0.513	Çok aşındırıcı	3.45	Çok aşındırıcı
2	3.05	0.633	Çok aşındırıcı	4.01	Çok aşındırıcı
3	1.60	0.304	Aşındırıcı	2.21	Çok aşındırıcı
4	1.50	0.280	Aşındırıcı	1.26	Çok aşındırıcı
5	1.50	0.280	Aşındırıcı	1.83	Çok aşındırıcı
6	1.15	0.194	Aşındırıcı	0.91	Aşındırıcı
7	1.00	0.157	Hafif aşındırıcı	0.25	Aşındırıcı değil
8	1.25	0.218	Aşındırıcı	0.48	Aşındırıcı değil
9	0.80	0.108	Hafif aşındırıcı	0.19	Aşındırıcı değil
10	0.80	0.108	Hafif aşındırıcı	0.04	Aşındırıcı değil
11	0.70	0.083	Hafif aşındırıcı	0.04	Aşındırıcı değil
12	2.40	0.501	Çok aşındırıcı	2.91	Çok aşındırıcı
13	2.30	0.476	Çok aşındırıcı	2.59	Çok aşındırıcı
14	1.65	0.317	Aşındırıcı	2.41	Çok aşındırıcı
15	1.72	0.334	Aşındırıcı	1.63	Çok aşındırıcı
16	3.10	0.672	Çok aşındırıcı	6.78	Çok aşındırıcı
17	0.70	0.083	Hafif aşındırıcı	0.19	Aşındırıcı değil
18	2.92	0.746	Çok aşındırıcı	6.15	Çok aşındırıcı
20	2.22	0.457	Çok aşındırıcı	1.57	Çok aşındırıcı
21	1.50	0.280	Aşındırıcı	2.36	Çok aşındırıcı
22	2.60	0.550	Çok aşındırıcı	3.80	Çok aşındırıcı
23	2.30	0.476	Çok aşındırıcı	2.57	Çok aşındırıcı
24	2.44	0.511	Çok aşındırıcı	4.11	Çok aşındırıcı
26	0.50	0.034	Değil-hafif aşındırıcı	0.15	Aşındırıcı değil
27	1.20	0.255	Aşındırıcı	0.30	Aşındırıcı değil
28	1.10	0.181	Orta aşındırıcı	0.68	Aşındırıcı
29	2.67	0.623	Çok aşındırıcı	5.10	Çok aşındırıcı
30	0.55	0.046	Hafif aşındırıcı	0.22	Aşındırıcı değil
31	0.80	0.108	Hafif aşındırıcı	0.27	Aşındırıcı değil

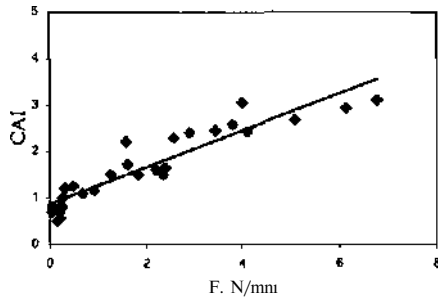


## S. SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kaya birimlerinin tek eksenli basınç dayanımlarının 30 MPa ile 128 MPa arasında değiştiği ve ISRM'e (1980) göre, 10-11-19-20-25-26-30-31 nolu örneklerin dayanımlarının orta dayanımda, diğer kaya örneklerinin ise yüksek dayanım sınıfında olduğu görülmüştür,

Formasyonların tek eksenli dolaylı çekme (Brazilian) dayanımlarının 5.45 ile 8.71 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir.

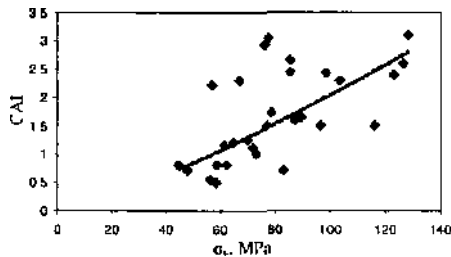
Schimazek ile Cerchar aşınma indeksleri arasında Şekil 5'de görüldüğü gibi doğrusal bir ilişki elde edilmiştir (Eşitlik 4). Benzer ilişki Becker & Lemmes (1984) ve Ewendt (1989) tarafından da bulunmuştur.



Şekil 5. F ve CAI değerleri arasındaki ilişki.

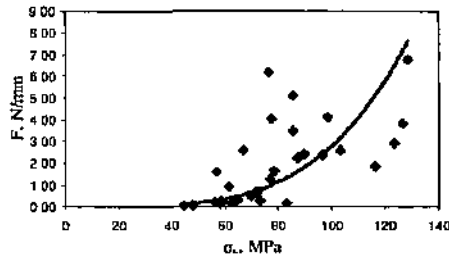
$$CAI = 0.3958F + 0.8735R = 0.93 \quad (4)$$

Kayaçların tek eksenli basınç dayanımları ( $\sigma_c$ ) ile Cerchar aşınma indeksi (CAI) ve Schimazek aşınma indeksi (F) arasında sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'deki gibi ilişki bulunmuştur (Eşitlik 5 ve 6).



Şekil 6.  $\sigma_c$  ile CAI arasındaki ilişki.

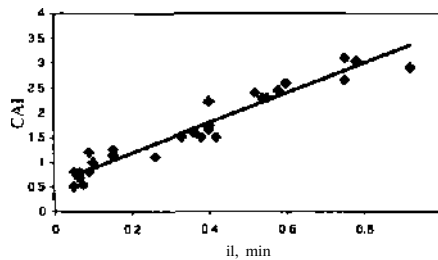
$$CAI = 0.0057 \sigma_c^{1.2776} \quad R = 0.66 \quad (5)$$



Şekil 7.  $\sigma_c$  ile F arasındaki ilişki.

$$F = 0.024e^{0.1145H \sigma_c} \quad R = 0.71 \quad (6)$$

Kayaçların içinde bulunan ortalama kuvars tane boyutu ile Cerchar aşınma indeksi değerleri arasındaki ilişki Şekil 8'de gösterilmiştir. Buna göre, ortalama kuvars tane boyutuyla Cerchar aşınma İndeksi arasında doğrusal bir ilişki (Eşitlik 7) elde edilmiş ve korelasyon katsayısı ise 0.97 gibi yüksek bir değerde gerçekleşmiştir. Literatüre bakıldığında bu iki büyüklük arasında elde edilen sonuç, Sauna & Peters (1981)'in yaptıkları çalışmayı desteklemektedir.

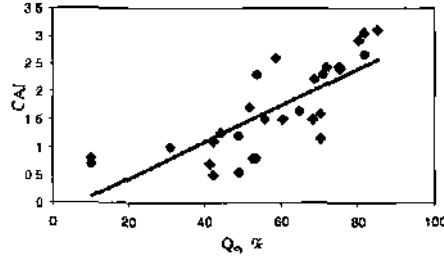


Şekil 8. Ortalama kuvars tane boyutu ile CAI arasındaki ilişki.

$$CAI = 3.0158d + 0.5828 \quad R = 0.97 \quad (7)$$

Şekil 9'da ise kayaçların içinde yer alan aşındırıcı mineralleri de kapsayan eşdeğer kuvars yüzdesi ile Cerchar aşınma indeksi değerleri karşılaştırılmıştır. Bu iki büyüklük arasında Eşitlik 8'de belirtildiği gibi doğrusal bir ilişki elde edilmiştir. Şekil 9 bakıldığında West\* (1986) yaptığı çalışmaya paralel bir sonuç bulunmuştur.

ft Yaralı



Şekil 9 Eşdeğer kuvars yüzdesi ile CAI arasındaki ilişki.

$$CAI = 0.0325Q_{cs} - 0.2054R = 0.77 \quad (8)$$

## 6 SONUÇLAR

Bu çatışmada, kayaçların aş indirici tıkanı belirlemek için yapılan Cerchar aşınma indeks deneyinin sonuçları aşındırıcılık sınıflamasına göre değerlendirilmiştir. İri taneli kumtaşlarının ölçülen CAI değerleri 2.45-2.92 arasında değişmektedir ve (CAI= 2.0-4.0) çok aşındırıcıdır. Orta taneli kumtaşlarının 1.50-2.22 arasında değişmektedir ve bazı kumtaşı örnekleri (CAI= 1.0-2.0) aşındırıcı, bazıları ise (CAI= 2.0-4.0) çok aşındırıcıdır. İnce taneli kumtaşlarının 1.10-3.10 arasında değişmektedir. Silttaşları 0.50-1.25 arasında değişmekte ve bazıları (CAI= 0.50-1.0) hafif aşındırıcı, bazıları ise (CAI= 1.0-2.0) aşındırıcıdır. Çamurtaşları ise 0.70-0.80 arasında değişmekte ve (CAI = 0.50-1.0) hafif aşındırıcıdır.

Havza'ya yönelik kayaçların aşındırıcılıklarının belirlenmesi için yapılan diğer araştırma sonuçlarıyla bulunan CAI değerleri karşılaştırıldığında, sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Cerchar aşınma indeks değerlerine göre incelenen kayaçların kazısında keski tüketiminin 0.083 ile 0.746 adet/m<sup>3</sup> arasında değiştiği saptanmıştır.

Kollu galeri açma makinalarının ekonomik ve verimli olarak kullanılabilmesi için seçilen makinaların tipine göre kayacın kesilebilirlik sınırında olması ve Schimazek aşınma değerinin 0.5 ile 1 N/mm'den fazla olmaması gerekmektedir (Bilgin 1989). Buna göre, 6-7-8-9-10-11-17-26-27-28-30-31 nolu kaya örneklerinin Schimazek aşınma indeks değerlerinin  $F < 1$  N/mm olduğundan uç sarfiyatı az, diğer kömür çevre kayaçlarının Schimazek aşınma indeks değerlerinin  $F > 1$  N/mm olduğundan uç sarfiyatının çok fazla olacağı belirlenmiştir.

Bu çalışmada incelenen Zonguldak Havzası kömür çevre kayaçlarının genel olarak aşındırıcı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuca göre bölgede yapılacak mekanize kazıda tüketilecek keski miktarı fazla olacaktır.

Bu çalışmada kayaçların aşındırıcılıklarının belirlenmesi yanında kayaçların tek eksenli basınç dayanımları ile aşınma indeksleri arasındaki ilişkiye de bakılmıştır. Buna göre; kayaçlarının dayanımlarının kayaç aşındırıcılığına etkisinin fazla olmadığı görülmüştür.

Genel olarak, kayaçların aşındırıcılığına kuvars tane boyunun ve kayaç içinde bulunan aşındırıcı minerallerin etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Havza'da önümüzdeki yıllar içerisinde galeri ilerlemelerinin hızlanması için mekanize kazının gerekliliği göz önüne alındığında, bu tarzda çalışmaların artırılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Özellikle kollu galeri açma makinalarında keski tüketiminin önceden belirlenmesine yönelik deneyler arasında Cerchar aşınma indeks deneyinin olması ve bu deney yönteminin üretici firmalar tarafından da kabul görmesi (Tamrock, 1999) bu indeks deneyinin önemini ortaya koymaktadır.

## TEŞEKKÜR

Bu bildiri, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenen "Kömür Çevre Kayaçlarının Petrografik Özellikleri İle Aşındırıcılık Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Belirlenmesi" başlıklı Araştırma Projesi (Proje Kod No: 2002-45-03-19) kapsamında hazırlanmıştır. Bu bildirinin hazırlanmasında her türlü imkanı sağlayan Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkür edilir.

## KAYNAKLAR

- Al-Anieen, S.I. and Waller, M.D., 1994; The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar abrasive index. *Engineering Geology, NoA*, Vol.36, pp.293-301.
- Atkinson, R.H., 1993; Hardness tests for rock characterization. *Comprehensive Rock Engineering*, (ed. J.A. Hudson). Vol:3, Chapter 5, pp 105-117.
- Avcı, F., 2001; *TTK Asma-Dilaver İşlemesi Kantır Çevre Kayaçlarının Aşındırıcılık Özelliklerinin Belirlenmesi*, Yüksek Mühendislik Tezi, ZKÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak. 100 s.
- Barbour, T.G., Atkinson, R.H. and Ko, H.Y., 1979; Relationship of mechanical index and mineralogical properties of coal measures rock, *20th Symposium on Rock Mechanics*, Austin, Texas, USA, pp. 189-

- 198
- Becker, H and Lemmes, F, 1984, Rock-physical examinations in roadway drivage. *Tunnel*, Vol 2184, pp 71-76
- Bilgin, N , 1989, *İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği*. Birsen Yayınevi, İstanbul, 192 s
- Cerman, T , 1988, Investigation into the Application of Cerchar Hardness and Abrasivity Tesis in Different Rock Formations of Ankara Coalfield and Evyap Tunnel, Yüksek Mühendislik Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü , Maden Mühendisliği Anabilim Dalı. İstanbul, 92 p
- Deketh H J R, 1995 *Wear of Rock Cutting Tools*, A A Balkema, Rotterdam, Netherlands, 143 p
- Erdaş E, 2002, *Bazı Kayaçların Cerchar Aşınma İndeksi Özelliği ile Belirlenmesi*, ZKU Müh Fak Maden Muh Bol Diploma Çalışması, Zonguldak, 32 s
- Evenden, M 1983, *Methods of Determining Rock Hardness And Abrasivity*, Doctor of Philosophy Thesis (unpublish). Institute of Technology and Science, University of Nottingham, England, 134p
- Holman J P and Gajda, W J Jr. 1984, *Experimental Methods for Engineers* Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company. London pp 47-99
- ISRM, 1980, Basic geotechnical description of rock masses, *Rock Mech Min Sei and Cotech Abstr* Vol 18, pp 85-110
- Kel. K, 2003 *Zonguldak Havzası Kontur Çeşre Kayaçlarının Kazılabilirliğini İncelenmesi* Doktora Tezi. ZKU. Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı. Zonguldak 181 s
- McFeat Smith, I and Powell, R J 1977. correlation of rock properties and the cutting performance of tunnelling machines, *Proceedings of a Conference on Rock Digging*, Newcastle Upon Tyne, England pp 581-602
- Plinninger, R Kasling, H. Thuro, K and Spaun, G 2003, Testing conditions and geomechanical properties influencing the Cerchar abrasiveness index value. Technical Note, *Int Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol 40, pp 259-263
- Schimazek, J And Knatz, H, 1970, Der Einfluss des gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den meisseiverschleiß von strecken Vortriebsmaschinen *Glutkauf* pp 274-278
- Suaria, M and Peters, T, 1982, The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography, *Rock Mechanics* Vol 15(1) pp 1-7
- Tamrock 1999 *Rock Excavation Handbook for CM!* *Engineering* 99 808 GB 6000 Sandvik Tamrock Corp 364 p
- Thuro, K and Plinninger, R J, 1998 Einführung in die Ingenieurgeologie, 7. Auflage Lehrstuhl für allgemeine und ingenieur geologie Technische Universität München pp 71-75
- Tunçdemir H . 2002, Kollu Galen Açma Makinelerinin veya Benzer Makinelerin Cevher Kazısında Kullanımlarının Arattırılması. Doktora Tezi İTÜ.Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 295 s
- West, G , 1981, A review of rock abrasiveness testing for tunneling. *Proceedings of International Symposium on Weak Rock*, Tokyo Balkema Pub , Rotterdam, pp 585-593
- West, G , 1986. A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measures sediments *Int J of Mining and Geological Engineering*, Vol 4, pp 73-78
- West, G. 1989 Rock abrasiveness testing for tunnelling Technical Note, *Int J of Rock Mech & Mm Sa Geomech Abur*. Vol 26, No 2. pp 151-160



## Kanalizasyon Şebekelerinin Kurulması Aşamasında Yapılması Gereken Jeoteknik Çalışmalar ve Örnek Bir Uygulama

A.M. Kılıç & N. Yapıcı

Çukurova Üniversitesi, Mülki Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

**ÖZET:** Bu çalışma da; Kadırlı İlçesi için yapılması düşünülen, kanalizasyon şebeke, toplayıcı ve arıtma sahalarının jeolojik ve jeoteknik değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu amaçla, derinlikleri 4-12.45 metre arasında değişen, 29 noktada 174.04 metre sondaj yapılmış ve zemin numuneleri alınmıştır. Ayrıca arıtma sahasında 2 adet 7.55 metre derinliğinde araştırma çukuru açılmıştır. Saha gözlemleri sonucunda, zeminlerin jeolojik özellikleri belirlenmiştir. Laboratuvar deneyleri sonucunda ise zeminlere ait jeomekanik parametreler belirlenmiştir. Son aşamada ise, zeminlere ait, emniyetli taşıma gücü hesabı yapılmıştır.

**ABSTRACT:** In this study, the geological and geotechnical evaluations in Kadırlı County are done which are planned to build the county's sewer system; the collector and the purification zones. To examine the properties of the study site, 29 different observation and drilling points were determined and several samples were taken by drilling boreholes, approximately between 4 and 12.45 m deep each at the total of 174.04 m. Also two observation holes are drilled about 7.55 m deep in the purification zone and the geological properties are determined from the study observations. However, the geomechanical parameters in these zones are also determined at the result of the experimental studies. At the last step, bearing ratio of safety is calculated at these zones.

### 1 GİRİŞ

Büyük yerleşim birimlerinde kanalizasyon şebekelerinin kurulması öncesi, şebeke, toplayıcı ve arıtma tesisi sahalarına ait olan zemin, yeraltı suyu ve mühendislik parametrelerinin belirlenmesi hayati bir önem taşımaktadır. Bu amaçla çalışma alanlarında gözlemsel saha jeolojisi çalışmaları, zeminin yeraltı suyu durumu ve zeminin jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Zeminin jeomekanik özelliklerini belirleyebilmek için ise temel araştırma sondajları yapılmalı ve bununla beraber araştırma çukurları da açılmalıdır. Ayrıca günümüzde bu tür çalışmaların yapılması, bir zorunluluk ve gereklilik olarak ta karşımıza çıkmaktadır.

Yeni işlerde zemin etütleri amacı ekonomik ve güvenli yapı tasarımı yapmak, yapım ve ihale için gerekli bilgileri güvenilir bir biçimde toplamaktır. Araştırma, önceden toplanan bilgileri doğrular ve onları geliştirici şekilde planlanmalıdır. Mevcut yapıların güvenliğinin araştırılmasına veya hasarlara

yönelik olarak yapılan araştırmalar ise ilgililenen konu ile doğrudan bağlantılı olacaktır (Yıldırım, 2002).

Zemin ve temel etütleri, temel tasarımı ile zemin-temel-yapı etkileşiminin irdelenmesinde kullanılacak zemin özellikleri ve zemin parametrelerinin tayini için yapılan ve çevresinde zemin ve yeraltı suyu ile ilgili bütün verilerin toplanması amacıyla yapılan çalışmalar olup bu çalışmaların sonucunda temel ön tasarımı belirlenir. Etütlerin kapsamı ve içeriği yapı özellikleri, zemin koşulları, civardaki yapılar, depremsellik, çevre ilişkileri ve yeraltı suyu durumu gibi faktörlere bağlıdır.

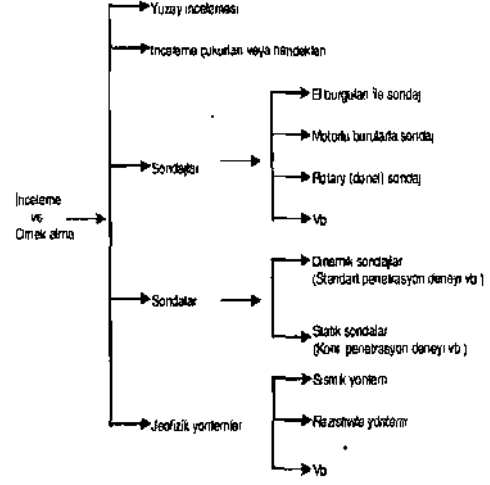
Zemin özellikleri ve üst yapı karakteristikleri arazi çalışmalarında kullanılacak yöntemlerin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Deneylerden elde edilen değerlerin yorumlanması, gerekli düzeltmelerin yapılması, doğru yerlerde amaca uygun kullanılması yapı güvenliği ve ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır.

Zemin etüt planlaması ve yorumlanmasındaki temel amaç sahanın jeolojisinin anlaşılmasıdır.

Mühendislik problemleri karmaşık değil ve jeoloji belirgin ise yeterli jeolojik bilgi sondaj ve deney çukurları ile doğrulanarak büro çalışmalarından elde edilir. Diğer durumlarda jeolojik haritalar hazırlanmalıdır.

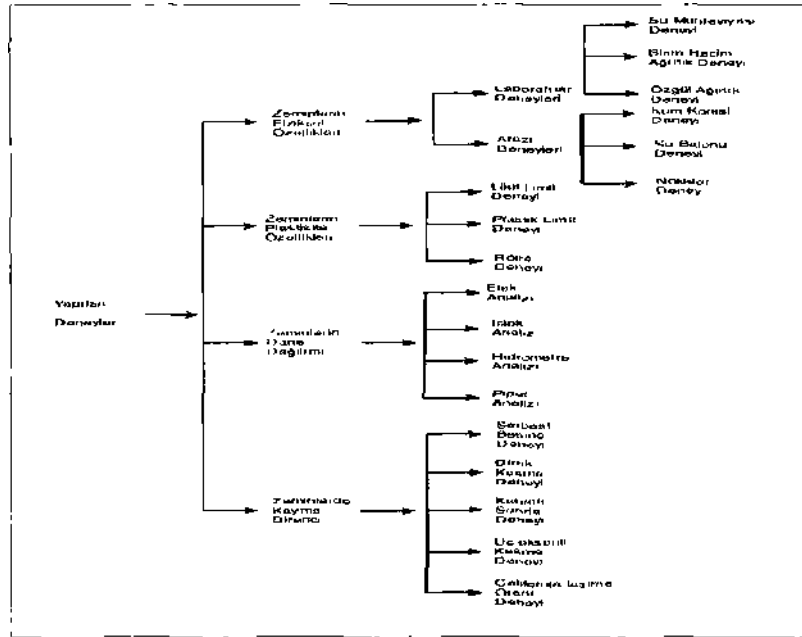
Zemindeki bilinmeyenlerin azaltılması ve gerçekçi bir tasarımın gerçekleştirilebilmesi için yeterli bir jeoteknik araştırmanın yapılması gerekmektedir. Ancak bu durum çoğu zaman gerçekleşmemekte ve arazi jeoteknik araştırmalarının maliyeti, bazen toplam proje bedelinin % 0.1-0.3 aralığına düşebilmektedir. Düşük araştırma seviyelerinde, zemin ile ilgili belirsizliklerin çok daha fazla olacağı bir gerçektir. Bu nedenle, NCR (1984); konuyla ilgili olarak uluslararası bir standart olmamasına rağmen, jeoteknik araştırma maliyetinin toplamı proje bedelinin en az %3'ü kadar olması noktasında bir öneri getirmiştir. Ancak yapılacak jeoteknik araştırma kapsamının, temel zeminyle ilgili değişkenlere göre daraltılıp, genişletilebileceği de ifade edilmektedir (Littlejohn et al., 1994; Whyte, 1995).

Zeminlerin incelenmesi ve örnek alma işleri birçok aşamadan meydana gelmektedir. Bu işlemler sayesinde zeminlerin tanınması daha basit olmakta ve zemin etüt çalışmalarında kolaylık sağlamaktadır. Zeminlerin incelenmesi Şekil 1'de verilmektedir.



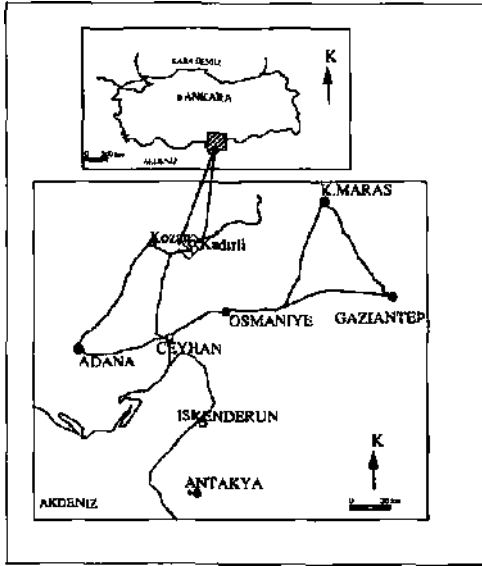
Şekil 1. Zemin İnceleme ve Örnek Alma Yöntemleri

Zemin etütlerinde zeminlerin fiziksel, plastisite, dane (granülometri) dağılım özellikleri ile zeminlerin geçirimsizliği, konsolidasyonu, oturması ve kayma direnci özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenmesi gereken bu özellikler Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Zemin Etütleri İçin Uygulanan Deneyler

Çalışma alanı, Osmaniye İH, Kadirli ilçesi sınırları içerisinde bulunmaktadır. Kadirli Doğu Akdeniz Bölgesinde olup Doğu Çukurova'nın kuzeydoğusunda yer alır. İlçenin doğusunda Andırın ve Diizici, Güneyinde Ceyhan ve Osmaniye, Batısında Kozan, Kuzeyinde Feke ve Saimbeyli bulunmaktadır. İlçenin doğal sınırları ise, Doğuda Ceyhan ve Keşiş, Güneyinde Ceyhan ırmağı. Batıda Sumbaş Çayı, kuzeyde Akçadağ ve Toklu Dağı ile çevrilidir (Şekil 3). Kadirli'nin yüzölçümü 1497 knT'dir. İlçe merkezinin deniz seviyesinden yüksekliği ise 95 metredir.



Şekil 3. Çalışma Alanı Yer Buldum Haritası

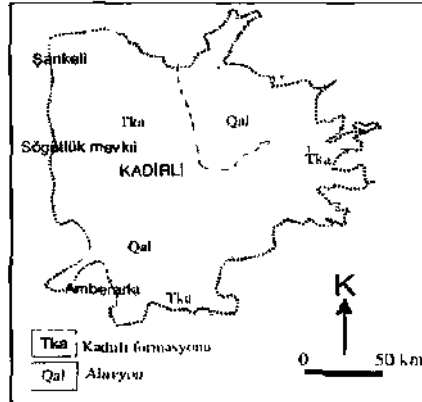
Araştırma için, gözlemsel olarak, saha jeolojisi çalışmaları, temel araştırma sondajları, yeraltı suyu, temel zeminin mühendislik parametreleri ve alman örneklerin laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar deneyleri (ASTM, 1994 ve TSE 1900) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

## 2 ÇALIŞMA ALANI HAKKINDA BİLGİLER

### 2.1 Çalışma Alanı Genel Jeolojisi

İnceleme bölgesi ve yakın çevresi, Üst Miyosen-PHYosen yaşlı Kadirli formasyonu içerisinde yer almaktadır. Formasyon, daha çok bölgede yüksek kotlu alanlarda ve yataya yakın tabakalıdır (Pompai, 1983). Başlıca; az tutturulmuş, çevrede

bulunan yaşça daha eski formasyonların (daha çok Mesezoik yaşlı Kireçtaşı ve Ofiyolit) bazen iyi yuvarlaklaşmış iş bazende köşeli çakıllarını içeren konglomera; kalın katmanlı, açık sarımsı renkli, ince taneli ve gevşek çimentolu kumtaşı; gri renkli ve bol gastropod katkılı killi kireçtaşı ve kil ve marn'dan oluşmaktadır. Marnlar yer yer kömürleşmiş bitki kalıntılarını içermektedir. Saha gözlemleri ve sondajlı etütlerde üst seviyelerin atmosferik koşullar nedeni ile ayrıştığı ve çakıllı-kumlu-killi-si İli rezidüel toprak tabakasına ve kalınlıkları yer yer 6.5 m'ye yaklaşan kaliçi oluşumlarına dönüştüğü belirlenmiştir (Pompai, 1986). Bölgede en genç birimleri ise alüvyon çökeller oluşturmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışma Alanı Jeoloji Haritası

### 2.2 Tektonik ve Deprem Durumu

Adana ili doğuda Doğu Anadolu Fay zone, batı ve kuzeybatıda ise Ecemiş fayı ile çevrelenmiş konumdadır. Türkiye'nin en büyük fay zonlarından birisi olan Doğu Anadolu fayı ve Ecemiş fayı günümüzde halen hareketini sürdüren aktif faylar olarak kabul edilmektedirler.

Doğu Anadolu fayı; sol yönlü doğrultu atımlı bir fay olup, Antakya'dan Karlıova'ya kadar uzanan yaklaşık KD-GB uzanımlı bir faydır. Doğu Anadolu Fay zone tek bir kırık sisteminden oluşmayıp irili ufaklı yüzlerce fayların birleşmesinden oluşmaktadır. Doğu Anadolu Fay zone üzerinde önceki araştırmacılar tarafından ölçülen fay zone genişliği yaklaşık 2-3 km olup, fayın toplam atımı (Arpat ve Şaroğlu, 1972) tarafından 22 km olarak tespit edilmiştir. Fay zone boyunca toplam düşey atım 400 metredir. Doğu Anadolu fay zoneunun

oluşumu Geç Miyosen'de Arap ve Anadolu levhalarının çarpışması ile oluşmuştur.

Ecemiş Fay Zonu; Yaklaşık olarak Kayseri-Yahyalı'nın batısında Dünderlı köyünden başlayarak KKD-GGB uzanımlı olarak Mersin-Gülek yakınlarına kadar uzanır. Genel doğrultusu K27D olan Ecemiş Fayı birbirine paralel bir çok kırık parçasından meydana gelmiştir. Dünderlı-Pozantı arasındaki 78 km'lik bölümde oldukça belirgin şekilde izlenmektedir. Pozantı-Gülek arasında Ecemiş Fayı küçük parçalara ayrılmaktadır.

Doğu Anadolu ve Ecemiş fayı dışında Adana ve yakın çevresinde gerek son oluşan depremlerin sebebi ile oluşmuş gerekse çok önceleri oluşmuş 2 adet ana fay zonu daha bulunmaktadır. Bunlar Karaisalı-Karsantı fay zonu ve Karataş-Osmaniye fay zonudur (Gökçen, 1988).

Karaisalı-Karsantı fay zonu, Adana havzasının kuzeyinde, Ecemiş fay zonunun güneyinde Karaisalı İle Karsantı arasında değişik boy ve doğrultularda gelişmiş olan çok sayıda kırıktan meydana gelen bir fay zonudur. Ecemiş ve Karataş-Osmaniye fay zonlarının arasında yer alması, çok geniş bir alanda izlenmesi ve 20km 'ye varan uzunlukta parçacıklarının izlenmesi ile önemli bir fay zonudur. Birbirine paralel iki ana doğrultu hakimdir (Wenk et al., 1998). Fayların KD-GB ve D-B uzanımlı olmak üzere İki ana doğrultuda yoğunlaştığı gözlenir. Bu iki farklı doğrultudaki fayların mekanizmalarının da birbirinden farklı çalıştığı gözlenmektedir. Bir kısmı sol yönlü doğrultu atımlı iken diğer bir kısmı da sağ yönlü doğrultu alımlı fay sistemine göre çalışmaktadır.

Karataş-Osman iye fay zonu ise, Adana ovasının GD'sunda Karataş-Osmaniye arasında genel doğrultusu KD-GB olan, yaklaşık 120km uzunluğunda bir zon içinde birbirine paralel bir çok (aydan oluşmaktadır. Bir çoğu kıyıya paralel olan bu faylar belirgin morfolojik görünümleri yanında Ku vaterner yaşlı kaya birimlerini etkilemeleri nedeniyle önemlidirler (Adalier and Aydingun, 1998).

### 3 SAHA VE SONDAJ ÇALIŞMALARI

Bu çalışma kapsamında Osmaniye İli'ne bağlı Kadirli İlçesi kanalizasyon şebekesi kurulması aşamamasında, saha jeolojisi çalışmaları gerçekleştirilmiş ve ayrıca zeminin yeraltı suyu durumu belirlenmiştir. Zemine ait jeomekanik özelliklerini belirlemek için, derinlikleri 4-12.45 metre arasında değişen 29 noktada 174.04 metre uzunluğa sahip sondaj yapılarak zemin numuneleri alınmıştır (TS 1901). Ayrıca anıma sahasında 2 adet

7.55 metre derinliğinde araştırma çukurları açılmıştır.

Yapılan sondaj ve araştırma çukurlarına ait bilgiler Çizelge 1 ve çalışmaların yapıldığı yerleri gösteren bazı kesiller ise Şekil 5,6,7,8 ve 9'da verilmektedir. Sondaj çalışmaları Crealius XC 90H/Rotary tipi sondaj makinesi ile gerçekleştirilmiştir.

Zemin birimlerinin sertlik ve sıklığını kontrol etmek amacı ile her 1.5 metre derinlikte bir standart penetrasyon testi (SPT) yapılmıştır. Sondajlarda toplam 108 adet Örselenmiş numune ile ince taneli zeminlerde hidrolik baskı kullanılarak 12 adet örselenmemiş numune (UD) alınmıştır.

Saha ve sondaj çalışmaları sonucunda çalışma alanıyla ilgili olarak bulunan Yerel jeoloji ve yer altı suyu bulguları da aşağıda verilmektedir.

#### 3.1 Yerci Jeoloji

##### 3.1.1 Kadirli Formasyonu (T<sup>^</sup>)

İnceleme alanımızda yaygın olarak tespit edilen Kadirli formasyonu yüksek kotlu alanlarda gözlenmektedir. Formasyon az tutturulmuş konglomera, kumtaşt, killi kireçtaşı, kil taşı ve marn'lardan meydana gelmiştir. Saha gözlemlerimiz ve sondajlı etütlerle, üst seviyelerinin atmosferik koşullar nedeni ile ileri derecede ayrıştığı ve çakıllı, kumlu, killi siltli rezidüel toprak tabakasına dönüştüğü belirlenmiştir. Gri, açık sarı, pembemsi renk tonlarına sahiptir. Formasyonun birimleri genel olarak yatay tabakalıdır. Kalınlığı, tip kesitlerinde 2425 m olarak belirlenmiş olup, 4000m kalınlığa erişebileceği söylenmektedir. Özellikle Savrun deresinin iki yanındaki yükselteleri oluşturmaktadır, içerdikleri fosiller nedeni ile yaşının Üst Miyosen-Pliyosen olduğu daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir (Pompai, 1983).

##### 3.1.2 Alüvyonlar (Q<sub>n,t</sub>)

İnceleme alanında geniş ve düz alanları kaplayan en genç oluşuklar, Kuvaterner yaşlı alüvyon çökelleridir. Kadirli ilçe merkezinin güney bölümünü ve Savrun dereninin kenar bölümlerini alüvyon çekelleri oluşturmuştur, ince taneliden iri taneliye değişen boyutta (kil, şilt, kum, çakıl, blok) sedimanlar ile temsil olunmaktadır.

#### 3.2 Yeraltı Suyu

İnceleme alanında yer alan. Tersiyer yaşlı Kadirli formasyonu İçerisinde gerçekleştirilen temel sondaj



araştırmalarında yeraltı suyuna rastlanmamıştır. Çalışılan zamanın yaz ve en kurak dönem olması nedeni ile alüvyon çökeileri İçerisinde açılan temci sondaj kuyularında da (sadece ST2'de 5.00m'de yeraltı suyu bulunmakta) yeraltı suyuna

rastlanmamıştır. Doğu Akdeniz iklimine sahip olan bölge, yaz ayları hariç oldukça yağış almaktadır. Yağış durumu 24.1 mm (Ağustos) ile 113.4 mm (Aralık) arasında değişmekte olup, yağış ortalaması ise 68.98 mm'dir (Meteoroloji. 2002).

Çizelge 1. Kanalizasyon Tatbikat Projesine Ait Temel Sondaj ve Araştırma Çukuru Listesi

Kuyu No	Koordinatlar			Derinlik (m)	Örselenmiş SPT	Örselenmemiş UD	YASS (m)
	Z	X	Y				
ST1	76.80	3063300	2736150	6.45	4	1	
ST2	73.50	2978750	2744050	6.45	4	1	5
SS3	86.50	3040800	2799950	4.00	2	1	
ST4	95.90	3000900	2858200	5.00	3	-	
SS5	83.90	2944400	2821550	4.00	2	1	
ST6	81.30	2866350	2834400	6.45	4	1	
SS7	110.10	2931550	2894950	3.74	2	-	
ST8	103.20	2938900	2958000	5.00	3	-	
ST9	84.80	2838100	2908700	6.45	4	-	
ST10	103.20	3125700	2924500	6.45	4	-	
SS11	94.50	2996700	3013700	4.00	2	-	
SS12	129.80	3042900	2915100	4.00	2	-	
ST13	97.95	3050900	3035200	6.45	4	1	
SS14	156.80	3089750	3134600	4.00	2	-	
ST15	107.75	2974850	3102000	5.00	3	1	
ST16	163.80	2999200	3200700	5.00	3	-	
ST17	123.50	2934200	3214450	4.80	3	-	
ST18	124.80	2879850	3179500	4.00	2	-	
ST19	105.60	2912300	3066000	4.00	2	1	
ST20	107.60	2930000	2992500	5.00	3	-	
ST21	106.60	2833350	3036700	4.00	2	-	
ST22	88.70	2818100	2939400	6.45	4	1	
SS23	105.85	2745600	3010400	4.00	2	1	
ST24	85.00	2732500	2862200	6.10	4	1	
STM25	81.80	2804800	2839300	6.45	4	-	
STM2	75.20	2919450	2744450	9.45	6	1	
SA1	79.20	2742950	2760010	12.45	8	-	
SA2	78.00	2746900	2744800	12.45	8	-	
SA3	78.00	2739500	2753000	12.45	8	2	
Toplam: 29 Adet Sondaj				174.04	108	12	
Araştırma Çukurları Bilgileri							
Çukur No	Koordinatlar			Derinlik (m)	Torba no (adet)	YASS (m)	
	Z	X	Z				
AÇ1	79.30	2750500	2754000	3.70	2	-	
AÇ 2	78.20	2742000	2751500	3.85	2	-	
Toplam: 2 Adet Çukur				7.55	4		

#### 4 LABORATUAR ÇALIŞMALARI

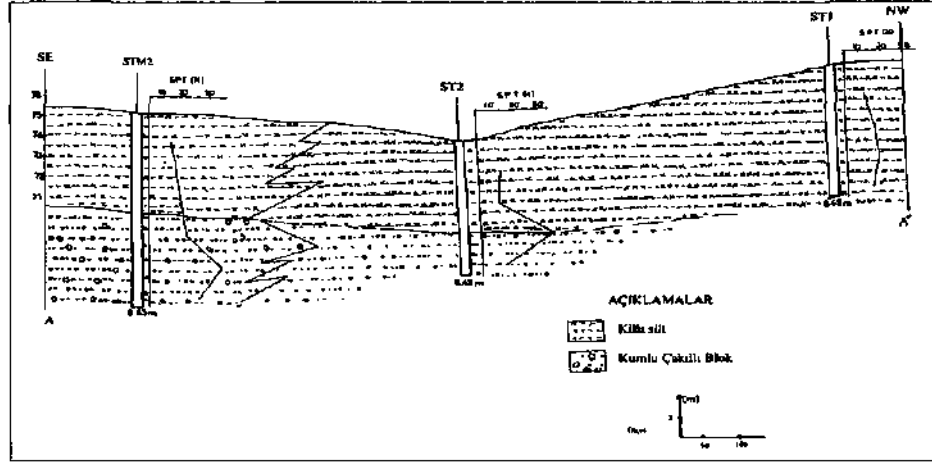
Sondaj çatışmaları sırasında zemin tabakalarından alınan SPT kodlu 16 adet örselenmiş ve UD kodlu 11 adet Örselenmemiş örnek üzerinde, zeminin mühendislik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla (ASTM, 1994 ve TSE 1900) standartlarına uygun

olarak deneyler zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Ayrıca arıtma sahasında açtırılan araştırma çukurlarından alınan torba numuneleri üzerinde zeminin geçirirliğini öğrenmeye yönelik olarak perméabilite deneyleri yapılmıştır.

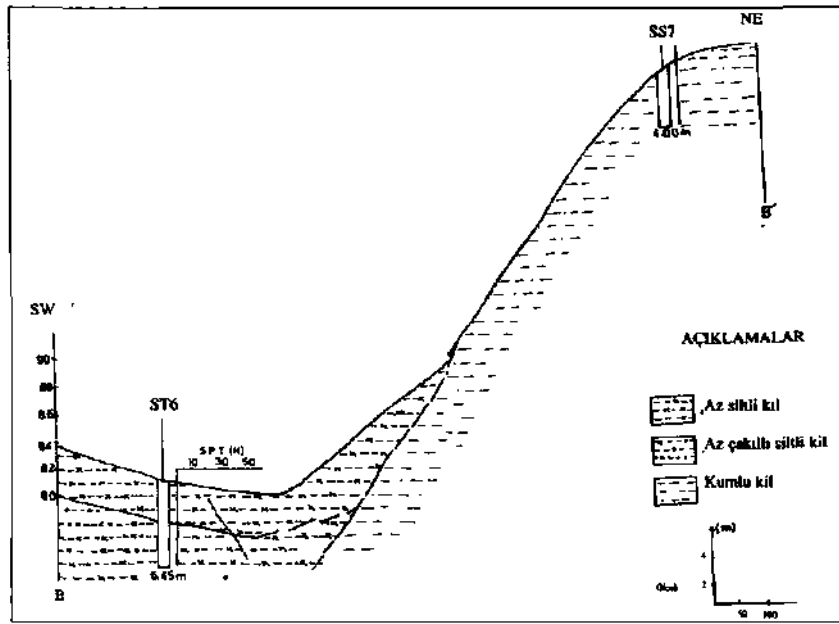
Zemin mekaniği deneyleri sonucunda kanalizasyon projesinin geçirileceği alanlara ait;

doğal su içeriği, Atterberg Limitleri, tabii birim hacim ağırlığı değerleri belirlenmiş, elek ve hidrometre analizleri gerçekleştirilerek zemin sınıflaması yapılmıştır. Üç eksenli basma deneyi ile kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri, konsolidasyon deneyleri sonucunda ise hacimsel sıkışabilirlik, şişme yüzde ve basıncı değerleri

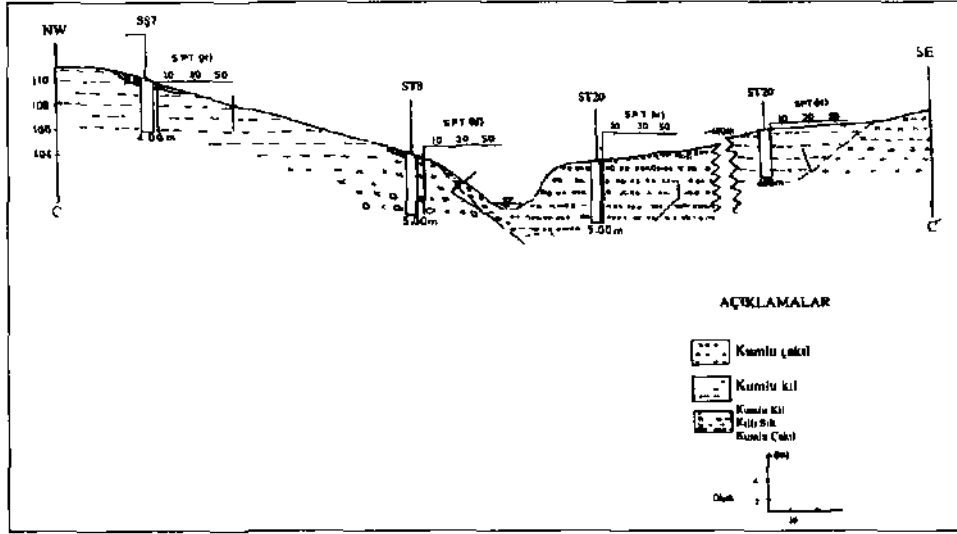
bulunmuştur. Son olarak arıtma tesisine ail Çukurlardan alınan örneklerden yararlanılarak perméabilite deneyleri sonucunda geçirimsizlik değerleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen bulgular toplu olarak Çizelge 2'de sunulmuştur.



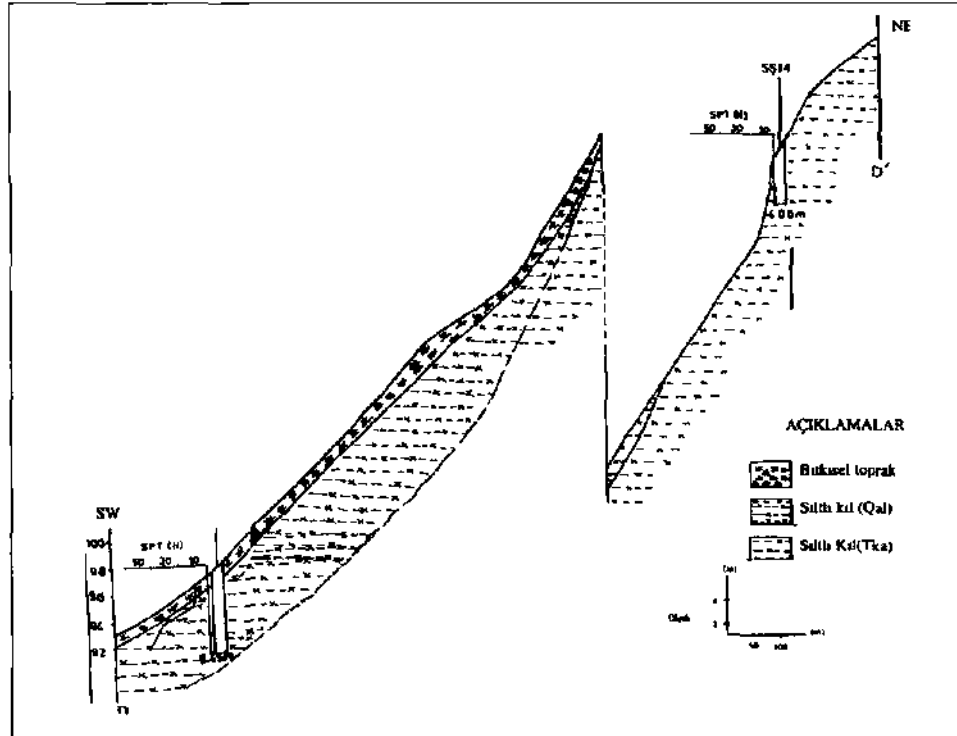
Şekil 5. ST1, ST2 ve STM3 Sondajlarının Konumlarına Alt Kesitler



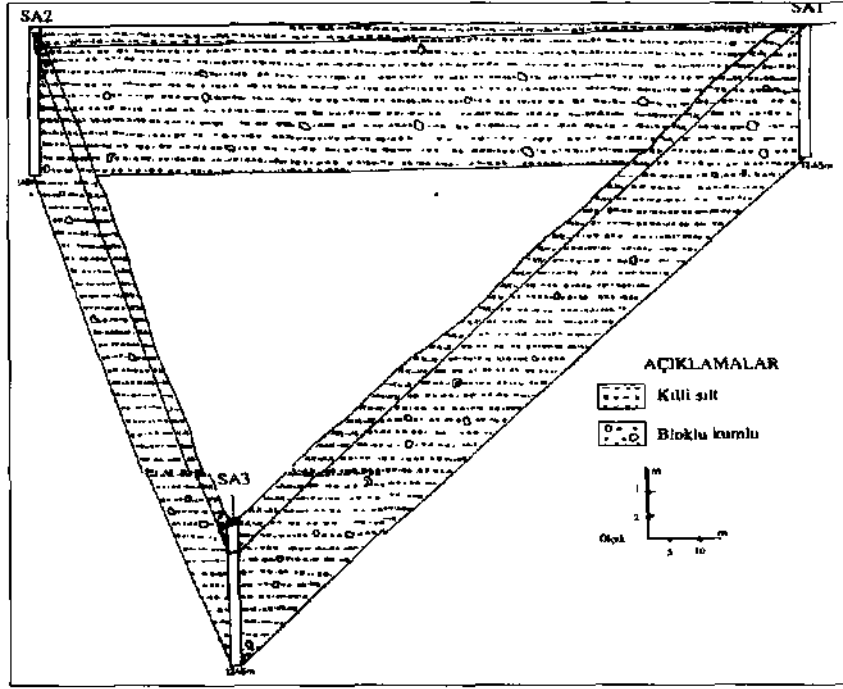
Şekil 6. ST6 ve ST7 Sondajlarının Konumlarına Ait Kesitler



Şekil 7 SŞ7, ST8, SŞ19 ve ST20 Sondajlarının Konumlarına Ait Kesitler



Şekil 8 SŞ7, ST8, SŞ19 ve ST20 Sondajlarının Konumlarına Ait Kesitler



Şekil 9. SA1, SA2 ve SA3 Sondajlarının Konumlarına Ail Kesitler

#### 4.1 Doğal Su İçeriği

Çalışma alanında yer alan zemin birimlerinin doğal su içerikleri, örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde tespit edilmiştir. Buna göre; Kuvaterner yaşlı İnce taneli alüvyon çökellerinin ( $Q_1$ ) doğal su içerikleri;  $W_n = 9-27.0$  aralığında, Tersiyer yaşlı Kadırlı formasyonunun ( $T_k$ ) üst seviyeleri ileri derecede altere olması sonucu rezidüel toprak tabakasına dönüşmüştür. Rezidüel toprak tabakasının ince taneli seviyelerinin doğal su içerikleri;  $W_n = 5-15$  aralığında değişim göstermektedir, ince taneli zeminlerin su içeriklerin LL (likit limit) ve PL (plastik limit) değerlerinin altında olması zeminin orta katı-kalı-sert kıvamlı olduğunu göstermektedir (Çizelge 2).

#### 4.2 Atterberg Limitleri (LL, PL, PI)

Deney sonuçlarına göre, alüvyon çökellerinin ( $Q_1$ ) LL (likit limit) değerleri, %39-64; PL (plastik limit) değerleri, % 16-27 ve PI (plastisite İndisi) değerlerinin ise, % 19-39 aralığında, rezidüel toprak tabakasının ( $Q_2$ ) likit limit değerlerinin, % 45-57 plastik limit değerlerinin, % 20-26 ve plastisite indisi değerlerinin ise, % 25-34 aralıklarında değiştiği belirlenmiştir. Yorum olarak proje

260

sahasındaki ince taneli zeminlerin orta-yüksek plastisiteli ve orta-yüksek şişme derecesine sahip olduğu söylenebilir.

#### 4.3 Tabii Birim Hacim Ağırlığı

Zemin birimlerinin tabii birim hacim ağırlıkları, genel olarak;  $\gamma_n = 1.8-2.3$  kg/cm<sup>3</sup> aralığında değiştiği tespit olunmuştur.

#### 4.4 Elek Analizi, Hidrometre ve Zemin Sınıflaması

Zemin tabakalarından alınan örnekler üzerinde tane boyu dağılımını belirlemek ve plastisite özellikleri ile birlikte zemin sınıflarını tayin edebilmek amacıyla elek analizleri yapılmış olup, 4, 10, 40, 100 ve 200 nolu elekten geçen malzeme yüzdeleri ve zeminlerin çakıl kum ve silt+kil içerikleri tayin edilmiştir. Hidrometre deneyi ile de 200 nolu elekten geçen ince taneli çökellerin oranları belirlenmiştir (Çizelge 2).

Sonuçlar İncelendiğinde, ince taneli alüvyonların ( $Q_1$ ) ve rezidüel toprağın ( $T^1$ ) CL (inorganik killer çakıllı killer, kumlu killer, silth killer, yağsız killer) -CH (yüksek plastisiteli inorganik killer, yağlı killer) grubu orta-yüksek plastisiteli zemin sınıfında

yer aldığı belirlenmiştir, iri taneli çökeller sahada analizleri yapılarak, zemin içerisindeki kil, silt, kum, gözlemsel olarak ve ayrıca laboratuarda elek çakıl oranları belirlenmiştir.

Çizelge 2. Deneyler Sonucunda Elde Edilen Bulgular

Sondaj No	Numunc Adı	Derinlik (Metre)	Wn (%)	Atterberg Limitleri			Elek Analizi		Zemin Grup	Üç Eksenli Basınç Deneyi		
				LL* (%)	PL* (%)	PI*	4	-200		Wn (%)	C* (kg/cm <sup>2</sup> )	φ* (°)
ST1	UD1	4-4.5	19	41	22	19	4	66		19	70	5
SŞ3	UD1	2.5-3	21	61	22	39	8	66	CL	21	67	10
ST4	SPT2	3-3.45	-	-	-	-	10	62	CH			
SŞ5	UD1	2.5-3	27	59	27	32	2	84		27	66	7
ST6	UD1	2.5-3	18	40	19	21	2	80	CH	18	106	9
SK9	SPT3	4.5-4.95	-	-	-	-	14	32	CL			
ST10	SPT4	6-6.45	-	-	-	-	16	20				
SŞ12	SPT2	3.5-4	-	-	-	-	10	42				
ST13	UD1	2.5-3	16	64	25	39	6	64		16	44	6
SŞ14	SPT2	3.5-4	19	-	-	-	2	83	CH			
ST15	UD1	2.5-3	5	45	20	25	4	74				
ST16	SPT3	4.55-5	7	57	25	32	6	69	CL			
SŞ19	UD1	2.5-3	19	48	22	26	2	71	CH	19	113	10
ST20	SPT3	4.5-4.95	-	-	-	-	4	70	CL			
SŞ21	SPT2	3.55-4	12	39	16	23	2	72				
ST22	UD1	2.5-3	20	59	27	32	1	86	CL			
ST22	SPT4	6-6.45	21	63	26	37	4	64	CH			
SŞ23	UD1	2.5-3	15	60	26	34	8	62	CH			
SŞ24	UD1	2.5-3	9	55	22	33	4	68	CH	20	72	6
STM2	UD1	4-4.5	14	58	26	32	1	80	CH			
STM2	SPT4	6-6.45					5	56	CH			
STM25	SPT1	1.5-1.95					6	63				
STM25	SPT3	4.5-4.95					6	54				
SA1	SPT4	6-6.45					22	10				
SA2	SPT1	1.5-1.95	14	42	22	20	4	42				
SA2	SPT5	7.5-7.95					32	6	CL			
SA3	SPT3	4.5-4.95					12	26				
AÇ1	UD1	0-1.6					6	68		Geçirimsizlik=7.36.10 <sup>-7</sup> m/s		
AÇ1		1.6-3.7					16	28		Geçirimsizlik=9.25.10 <sup>-4</sup> m/s		
AÇ2		0-2.8					16	42		Geçirimsizlik=4.91.10 <sup>-6</sup> m/s		
AÇ2		2.8-3.85					30	14		Geçirimsizlik=1.27.10 <sup>-4</sup> m/s		

LL\*: Likit limit; PL\*: Plastik limit; PI\*: Plastisite indisi C\*: Kohzyon: <φ>: içsel sürtünme açısı

#### 4.5 Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Proje sahasından alınan 8 adet örselenmemiş (UD) örnek üzerinde üç eksenli basınç deneyleri (UU) yapılmış olup, dayanım parametreleri; tabii birim hacim ağırlığı (γ<sub>n</sub>)=1.8-2.3 kg/cm<sup>3</sup>, kohezyon (C)=44-113 kg/cnV ve İçsel sürtünme açısı (φ)=5-10° olarak tespit edilmiştir.

#### 4.6 Konsolidasyon Deneyi

Örselenmemiş bir adet örnek üzerinde (STM2) zeminin delormasyon özelliklerinin tayin amacı ile konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Deney sonucuna

göre CH sınıfında olan ince taneli çökelin hacimsel sıkışabilirliği (m<sub>j</sub>, 1.00-2.00 kg/cm<sup>2</sup> olağan basınç aralığında, 0.00925 cmVkg arasında bulunmuştur. Örselenmemiş örneğin, şişme yüzdesi, 3.75 ve şişme basıncı ise 1.00 kg/cm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur.

#### 4.7 Perméabilité Deneyi

Çalışma alanı atık su arıtma tesisi sahasında deneyler için açtırılan araştırma çukurlarından alınan torba numuneler üzerinde perméabilité deneyleri yapılmıştır. Üst seviyelerdeki killi, siltli yer yer de az kumlu olan alüvyon çökellerinin perméabilitesini; 4.91 x 10<sup>-6</sup> ve 7.36 x 10<sup>-7</sup> m/s olarak, daha alt

seviyedeki bloklu, çakıllı, kumlu, yer yer de siltli olan ın alüvyon çokellerinde ise 1 27 9 25x10<sup>4</sup>m/s olarak belirlenmiştir Arıtma sahasında usl seviyelerde 'er alan, genel olarak kılı siltli yer yer de kum ^akıllı zemin birimi <tz geçinmlı zemin sınıfın gırekcın ^aha alt seviyelerdeki bloklu, kumlu, çakıllı yer yer de siltli olan ın taneli malzeme geçinmlı sınıfla yer aldığı tespit edilmiştir

## 5 BULGULARIN JEOTEKNİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmanın gerçekleştirildiği kanalizasyon hattının geçeceği alanları kapsayan zeminler, Tersiyer yaşlı Kadırlı Foı masyonu (T^O içinde az tutturulmuş konglomera, kumtaşı, kılı kireçtaşı, kıltaşı ve marnların ust seviyelerinin iten derecede alterasyonu sonucu oluşan rezidual toprak tabakası ile daha genç oluşumlu olan ve blok, çakıl, kum, şilt, kıl sedımanlarının yer aldığı alüvyon (Q<sub>u1</sub>) çokelleri şeklindedir Jeoteknik değerdendirmenin yapılması için, her bir formasyondaki birimler ikiye ayrılarak, laboratuar deneyleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak, emniyetli zemin genime (q<sub>em</sub>) değerdendirmen hesaplanmıştır

### 5.1 Zeminin Emniyetli Taşıma Gucu Hesabı

Bu çalışmada, birimlerin (T^, ve Q<sub>a</sub>) dayanım özellikleri doğrudan örselenmemiş numuneler üzerinde laboratuar deneyler yapılarak bulunmuştur Hesaplamalarda, Terzaghi'nın,

$$q_t = K_1 C N_c + \gamma_1 D_1 N_1 + 0.5 K_2 \gamma_2 B N_g \quad (1)$$

$$q_t^1 = q_t - \gamma_1 D_1 \quad (2)$$

$$q_{em} = \frac{q_t^1}{G_s} \quad (3)$$

Yukarıda verilen 3 eşitliğinden faydalanılmıştır Burada,

q<sub>em</sub> Zeminin emniyetli taşıma gucu (kg/cm<sup>2</sup>)

q<sub>t</sub> Taşıma gucu (kg/cm<sup>2</sup>)

q<sub>t</sub> Net Taşıma gucu (kg/cm<sup>2</sup>)

C Kohezyon fkgf/cm<sup>2</sup>)

γ<sub>1</sub> y- > Birim hacim ağırlıkları (kg/cm<sup>3</sup>)

D<sub>1</sub> Temel kalınlığı (cm)

B Temel genişliği (cm)

İ İçsel sürtünme açısı

N<sub>c</sub>, N<sub>s</sub> ve N<sub>g</sub> İçsel sürtünme açısına bağlı katsayılar

K<sub>1</sub> ve K<sub>2</sub> Temel şekline bağlı katsayılar (Çizelge 3)

G<sub>s</sub> Emniyet katsayısı (2 ile 5 arasında değışmektedir)

## 5.2 Kadırlı Formasyonu (TW) İçin Yapılan Hesaplamalar

Çalışmaların gerçekleştirildiği sahasının bu bölümü topografik olarak daha eğimli alanlarını oluştururlar Usl Miyosen-Pliyosen yaşında olan Kadırlı formasyonu çokelleri yatay tabakalıdır Yapılan sondajlı etütlerle usl seviyelerinin atmosferik koşullar nedeni ile ileri derecede alterasyona uğradığı tespit edilmiştir Çakıl, kum, şilt ve kıl bo yutunda ayrışıp rezidual (yerinde) toprak tabakasına dönüşen bu çokeller, kahve, pembemsi, sarımsı, bej renk tonlarına sahiptir

Çizelge 3 Hesaplamalarda Kullanılan K<sub>1</sub> ve K<sub>2</sub> Değerdendirmen

Temel Şekli	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>
Şerit	1	0.5
Kare	1.2	0.4
Daire	1.3	0.3
Dikdörtgen	1 + 0.2 $\frac{B}{L}$	0.5 - 0.1 $\frac{B}{L}$

Rezidual toprağın (T&) ince taneli seviyeleri genel olarak kılı şilt şeklinde belirlenmiş olup, çok katı-sert kıvamlıdır, içlerinde yer yer kum ve çakıllar bulunmaktadır BirleşUnlmış zemin sınıflamasına göre CL CH grubunda olup (TS 1500), orta-yuksek plastisiteli ve orta-yuksek şişme derecesine sahiptir Projelendirmede kullanılacak ve aşağıda verilen zemin parametreleri, saha ve laboratuar değerdendirmen esas alınarak, γ<sub>s</sub> 1.9 ton/m<sup>3</sup>, C 44 kg/cm<sup>2</sup>, İ 6°, 1.2 ve 3 formüllerinden hareketle, zeminin emniyetli taşıma gucu (q<sub>m</sub>)=15 kg/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır Burada, K<sub>1</sub> ve K<sub>2</sub> 1 ve 0.5 (şeni temel olduğu için), N<sub>c</sub>=6.5, N<sub>s</sub>=1.5 ve N<sub>g</sub>=0 (<p=6 olduğu için) ve 2m genişliğinde ve 2m derinliğindeki bir şeni temel için G<sub>s</sub>=3 olarak alınmıştır (Uzuner, 2000)

Rezidual toprak tabakasının ın taneli seviyeleri (kum, çakıl) sıkı-çok sıkı yapıda olup, yer yer in çakıllar ve şilt çokelleri içermektedir (hesaplamalarda ın taneli zeminlere ait özellikler sahada yapılan deneyler ile belirlenmiştir) Buradaki hesaplamalarda da aynı formüller kullanılarak q<sub>em</sub>=6.8 kg/cm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur Burada, K<sub>1</sub> ve K<sub>2</sub> 1 ve 0.5 (şerit temel olduğu için), N<sub>c</sub>=52.2, N<sub>s</sub>=36 ve N<sub>g</sub>=36 (<İ>=34 olduğu için) ve 2m genişliğinde ve 2m dennlğindeki bir ,eril temel için G<sub>s</sub>=3 olarak alınmıştır (Uzuner, 2000)

### 5.3 Alüvyonlar <Q<sub>1</sub>> İçin Yapılan Hesaplamalar

Temel araştırma sondajları sonucu. Kadırlı ilçesinde alüvyon çokellerinin oluşturduğu düzlüklerde, ince ianeden blok boyutuna kadar değışen çapta sedımanlar tespit edilmiştir Genel olarak, Kuvaterner yaşlı alüvyon çokellerinin usı

seviyelerinde kalınlığı değişken olan kahve, bej renkli, içlerinde yer yer kum çakıl tanelen bulunduran, çok katı-sert kıvamlı kılı şilt, sı İtlı kıl, kumlu kıl, çakıllı şilt turu, ağırlığı ince taneli malzeme olan sedımanlar belirlenmiştir CL CH grubu orta-yuksek plasıtelıdır Kuvaterner yaşlı alüvyon çökellerinin ince taneli bölümlerinde kullanılacak zemin parametreleri, projelendirmede kullanılacak ve aşağıda verilen zemin parametreleri, saha ve laboratuar değerleri esas alınarak,  $\gamma_s = 19 \text{ ton/m}^3$ ,  $C = 0.7 \text{ kg/cm}^2$ ,  $f_l > 5''$ . 1, 2 ve 3 formüllerinden hareketle, zeminin emniyetli taşıma gucu ( $q_{em}$ )=17 kg/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır Burada,  $K_1$  ve  $K_2$  1 ve 0.5 (şerit temel olduğu için),  $K_3=6.5$ ,  $N_1=1.5$  ve  $N_2=0$  ( $0=6$  olduğu için) ve 2m genişliğinde ve 2m derinliğindeki bir şerit temel için  $G_s=3$  olarak alınmıştır (Üzuner, 2000)

Alüvyon çökellerinin ın taneli bolumlen kum, çakıl ve bloklı yapıdan oluşmaktadır Özellikle Savrun deresine yakın olan temel sondaj kuyularında, ın taneli alüvyonlar yoğun olarak gözlenmiştir Arıtma sahasında ise ust seviyelerde ince taneli sedımanlar, alt seviyelerde ın taneli çökeller temel araştırma kuyuları ve araştırma çukurları ile tespit olunmuştur Gri, bej renkli, orta sıkı-sıkı-çok sıkı yapılı, içlerinde taneleri bağlayıcı özellikte ince taneli sedımanlar bulunmaktadır (hesaplamalarda ın taneli zeminlere ait özellikler sahada yapılan deneyler ile belirlenmiştir) Buradaki hesaplamalarda da aynı formüller kullanılarak  $q_{em}=4.1 \text{ kg/cm}^2$  olarak bulunmuştur Burada,  $K_1$  ve  $K_2$  1 ve 0.5 (şerit temel olduğu için),  $N_1=37.2$ ,  $N_2=23$  ve  $N_3=20$  ( $C_P=30$  olduğu için) ve 2m genişliğinde ve 2m derinliğindeki bir şerit temel için  $G_s=3$  olarak alınmıştır (Üzuner, 2000)

İnce taneli alüvyon çökellerinin 1 00-2 00 kg/cm<sup>2</sup> olağan basın aralığındaki hacimsel sıkılaşılabilirlik değerleri,  $mv=0.00925 \text{ cm}^3/\text{kg}$  olarak bulunmuştur

#### S.4 Atık Su Arıtma Sahası

Yapılan etütlerde arıtma sahasının Alüvyonlardan ( $Q_{a1}$ ) oluştuğu gözlemlenmiştir Ust seviyelerde kalınlığı 1 50 metre ile 2 75 metre aralığında değişen ince taneli kılı şilt çökellerinin bulunduğu tespit edilmiştir İnce taneli malzeme içerisinde yer yer kum çakıl tanelen bulunmaktadır Kılı şilt çökeilen altında gri renkli, orta sıkı sıkı-çok sıkı yapılı, içlerinde ortalama %15 düzeyinde in te taneli malzeme bulunduran, ın taneli kumlu çakıl çökeilen yer almaktadır

Arıtma sahasının yapısı da Alüvyonlar ( $Q_j$ ) biçiminde olduğundan, bir önceki bölümde aynı tip zemin yapısı için yapılan zemin emniyet gerilmesi ( $q_{em}$ ) hesaplamaları aynen geçerlidir Yani ince

taneli Alüvyonlar için, zeminin emniyetli taşıma gucu ( $q_{em}$ )= 7 kg/cm<sup>2</sup> ve ın taneli Alüvyon çökeller için ise, zemin emniyet gerilmesi ( $q_{em}$ )=4.1 kg/cm<sup>2</sup> olarak alınmıştır Ayrıca, permeabilite deneylen sonucunda, ust seviyelerdeki kılı şilt çö'ellerinin perméabilité değen,  $491 \times 10^{-8}$  ile  $7.36 \times 10^{-7}$  m/s aralığında bulunmuştur ın taneli kumlu çakıl çökellerinin permeabilite değeri ise  $1.27-9.25 \times 10^{-4}$  m/s olarak bulunmuştur Yapılan değerlendirmede ince taneli çökeller az geçirirli iken, ın taneli çökeller geçirirli sınıtta yer aldığı görülmüştür

## 6 SONUÇLAR

Gerçekleştirilmiş olan bu çalışma kapsamında, Kadirli ilçesi için yapılması düşünülen, kanalizasyon şebeke, toplayıcı ve arıtma sahaları jeolojik ve jeoteknik yönden değerlendirilmesi yapılmıştır

Zemine ait jeomekanik özelliklerini belirlemek için, denlikleri 4-12 45 metre arasında değişen 29 noktada 174 04 metre uzunluğa sahip sondaj yapılarak zemin numuneleri alınmıştır Ayrıca arıtma sahasında 2 adet 7 55 metre derinliğinde araştırma çukurları açılmıştır Zemin birimlerinin sertlik ve sıklığını kontrol etmek amacı ile her 1 5 metre derinlikte bir standart penetrasyon testi (SPT) yapılmıştır Sondajlarda toplam 108 adet örselenmiş numune ile ince taneli zeminlerde hidrolik baskı kullanarak 12 adet örselenmemiş numune (UD) alınmıştır

Jeolojik açıdan yapılan saha gözlemlen sonucu, inceleme alanındaki Tersiyer yaşlı Kadirli formasyonunun ( $T_{10}$ ) az tutturulmuş konglomera, kumtaşı, kıltaşı, kılı kireçtaşı, marnlardan teşekkül etmiş olduğu, genel olarak yüksek topografyaya sahip alanları meydana getirdiği görülmüştür Ayrıca, Kadirli formasyonuna ait birimlerin ust seviyeleri ile derecede alterasyon sonucu reziduel toprak tabakasına dönüşmüştür Reziduel toprak tabakası kılı, sikli, kumlu, çakılı birimlerden meydana gelmiş olup, inceleme alanındaki daha du? alanları Kuvaterner yaşlı alüvyon çökeilen ( $Q_{a1}$ ) oluşturmuştur Alüvyon çökeilen kıl, şilt, kum çakıl ve blok turu sedımanlardan oluşmuştur

Çalışma alanında yer alan zemin birimlerinin doğal su içerikleri, Kuvaterner yaşlı ince taneli alüvyon çökellerinin ( $Q_{a1}$ ) doğal su içerikleri,  $W_n=\%9-27.0$  aralığında, Tersiyer yaşlı Kadılı formasyonunun ( $T_{10}$ ) *usl* seviyeleri ile derecede altere olması sonucu reziduel toprak tabakasına dönüşmüştür Reziduel toprak tabakasının ince taneli seviyeleri inin doğal su içerikleri,  $W_n=\%5-15$  aralığında değişim göstermektedir, ince taneli zeminlenn su içeriklerin LL (likit limit) ve PL

(plastik limit) değerlerinin altında olması zeminin orta kalı-katı-sert kıvamlı olduğunu göstermektedir.

Alüvyon çökellerinin (Qal) LL (likil limit) değerleri, %39-64; PL (plastik limit) değerleri, % 16-27 ve PI (plaslisite indisi) değerlerinin ise, % 19-39 aralığında, rezidüel toprak tabakasının (Q<sub>u</sub>) likit limit değerlerinin, % 45-57 plastik limit değerlerinin, % 20-26 ve plaslisite indisi değerlerinin ise, % 25-34 aralıklarında değiştiği belirlenmiştir. Genel bir yorum olarak proje sahasındaki ince taneli zeminlerin orta- yüksek plastisiteli ve orta-yüksek şişme derecesine sahip olduğu söylenebilir.

Zemin birimlerinin tabii birim hacim ağırlıkları, genel olarak:  $\gamma_{s,} = 1.8-2.3 \text{ kg/cm}^3$  aralığında değişmektedir.

Yapılan zemin sınıflamasına göre; ince taneli alüvyonların (Q<sub>u</sub>) ve rezidüel toprağın (TkJ CL (inorganik killer çakıllı killer, kumlu killer, siltli killer, yağsız killer)-CH (yüksek plastisiteli inorganik klller, yağlı killer) grubu orta-yüksek plastisiteli zemin sınıfında yer aldığı belirlenmiştir.

Üç eksenli basınç deneyleri sonucunda dayanım parametreleri; tabii birim hacim ağırlığı ( $\gamma_{s,}$ )=1.8-2.3 kg/cm<sup>3</sup>, kohezyon (C)=44-113kg/cm<sup>2</sup> ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ )=5-10° olarak tespit edilmiştir.

Konsolidasyon deneyi sonucunda CH sınıfında olan ince taneli çökelin hacimsel sıkışabilirliği (m<sub>v</sub>), 1.00-2.00 kg/cm<sup>2</sup> olağan basınç aralığında, 0.00925 cm<sup>3</sup>/kg arasında bulunmuştur. Örselememiş örneğin, şişme yüzdesi, 3.75 ve şişme basıncı ise 1.00 kg/cm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur.

Atık su arıtma tesisi sahası için yapılan perméabilite deneyleri sonucunda; üst seviyelerdeki killi, siltli yer yer de az kumlu olan alüvyon çökellerinin permeabilitesi;  $4.91 \times 10^{-10}$  ve  $7.36 \times 10^{-10}$  m/s olarak, daha alt seviyedeki bloklu, çakıllı, kumlu, yer yer de siltli olan iri alüvyon çökellerinde ise  $1.27-9.25 \times 10^{-10}$  m/s olarak belirlenmiştir. Arıtma sahasında üst seviyelerde yer alan, genel olarak killi siltli yer yer de kum, çakıllı zemin birimi az geçirimsiz zemin sınıfına girerken, daha alt seviyelerdeki bloklu, kumlu, çakıllı yer yer de siltli olan iri taneli malzeme geçirimsiz sınıfta yer aldığı tespit edilmiştir.

Kadirli Formasyonu (Tt.) içerisinde yer alan ince taneli rezidüel toprak tabakasının zeminin emniyetli taşıma gücü ( $q^{TM}$ )=1.15 kg/cm<sup>2</sup>, iri tanelilerin, 4.1 1.15 kg/cm<sup>2</sup>, Alüvyon Çökellerin (Qal), ince taneli kısımlarının ki, 1.7 ve iri taneli kısımları ise 6.8kg/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmış olup, bu değerler yapılacak olan kanalizasyon inşaatının tabana uygulayacağı basıncı kaldıracak güçtedir.

İnceleme alanı içerisinde açılan temel sondaj kuyularının sadece bir ianesinde (ST2), 5-00 metre

derinliğinde yeraltı suyuna rastlanmıştır. Diğer lokasyonlarda ve arıtma sahasındaki araştırma çukurlarında yeraltı suyu tespit edilememiştir.

Proje sahasındaki temel tabanları (özellikle anima sahası) farklı oturumların önlenmesi için tek tip zemine (örneğin killi silt veya çakıllı kum) yerleştirilmelidir.

#### KAYNAKLAR

- Adalier K. and Aydingun O., 1998-, Sınırcımu engineering aspects of the June 27, 1995 Adana Ceyhan (Turkey) earthquake. Engineering Structure. 23. Issue 4, 343-335.
- Arpat E. ve Şaroğlu F., 1972; Doğu Anadolu Fayı ile ilgili bazı gözlemler ve düşünceler. MTA Dergisi. 78.44-50
- ASTM (American Society for Testing and Material), 1994; Annual Boak of ASTM Standards Construction; Soil and Rock. ASTM Publication. V.04.08.978 pp.
- Gökçen S.I., Kelling G., Floyd P.A. and Gökçen N., 1988: Sedimentology of a late cenozoic collisional sequence: the MisLs complex. Adana, Southern Turkey. Sedimentary Geology, 59:205-235.
- Littlejohn G.S., Cole, K.W and Mellon\*. T.W., 1994: Without She Investigation Ground is A Hazard Proc. Inst. Civil Engrs.Civil Eng. Vol.102, May. 72-78.
- Meierolojİ. 2002: Kadirli ilçesine Ait Yağış İstatistikleri NCR, 1984; Geotechnical Site Investigation for Underground Projects, ÜS Nationale Research Council. National Committee on Tunneling Technology. V.I. National Academy Pres, Washington.
- Pompai S., 1986; Savnırı Dağı Batısında Yer alan Taş Köprü ( K ad iri i )Akçal uşağı-Zinciri i kuyu (Kozan) Arasındaki Bölgenin jeolojisi. Gazi Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Dergisi. cill I. no: 1. S 65-100.1986. Ankara.
- Pompai S., 1983: Doğu Toroslarda Kadirli-Kozan-Feke (Adana) ile Çokak (K.Maraş) Arasındaki Bölgenin Stratigrafisi ve Teklonik Özellikleri. S.U. Müh.-Mim. Fak. Jeoloji müh. Bini. Doktora Tezi 133 s. Konya.
- TS 1900, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Deneyleri, Ankara.
- TS 1500, inşaat Mühendisliğinde Zemin Sınıflandırılması. Ankara.
- TS 1901. hvsaal Mühendisi iğinde Sondaj Yolları ile Örselemiş ve Örselememiş Numune Alma Yöntemleri. Ankara.
- Uzuner B.A. 2000: Temel Zemin Mühendisliğine Giriş. Derya Yayınevi, Trabzon.. sf203
- Wenk T., Corinne L. and Kaspar P., 1998; The Adana-Ceyhan earthquake of June 27, 1998. Report on the Reconnaissance Mission From July 6-12, of the Swiss Society of Earthquake Engineering and Slniciural Dynamics (SGEB).
- Whyie I.L.. 1995: The Financial Benefit from Site Investigation Strategy. Ground Engineering, Oct.. 33-36.
- Yıldırım S., 2002. Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı. Birsen Yayın Evi. İstanbul. 466sf



## Kayaç Dayanımı ile Şekil Değiştirme Enerjisi İlişkilerinin İncelenmesi

A. Kılıç, S. Ural, C. D. Atiş & A. Teymen

Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Adana, Türkiye

**ÖZET:** Bu çalışmada, kayaçların tek eksenli basınç dayanımları ile şekil değiştirme enerjileri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu amaçla, numuneler kırılmaya kadar geçen süre içerisinde, makinenin kullandığı elektrik enerjisi ölçülmüş ve bu enerji ile kayacın tek eksenli basınç dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Sonuç olarak; kayaçların dayanımları ile kırılma enerjileri arasında doğrusal bir ilişkinin var olduğu, ancak, dayanım ile şekil değiştirme enerjisi arasında bulunan ilişkinin oldukça zayıf olduğu görülmüştür.

**ABSTRACT:** In this study, relationship between uniaxial compressive strength (UCS) and strain energy density was investigated. For this aim, electric energy used until failure of the specimen under compression were measured, than the relationships between the electric energy and the UCS of the rock, and the electric energy and the strain-energy density were established. As a result of the analyses, it was seen that there is a good relationship between UCS and energy consumed until failure, whereas the relationship between UCS and strain-energy density is found to be weaker.

### 1 GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı; farklı kökenlere ve farklı dayanımlara sahip kayaçların tek eksenli basınç gerilmesi altında kırılabilmesi için gerekli olan gerçek enerjinin belirlenmesi ve bu enerji ile kayaçların birim şekil değiştirme enerjisi (Strain energy) ve spesifik enerjisi arasındaki ilişkilerin belirlenmesidir.

Birim şekil değiştirme enerjisi, elastik şekil değiştirme nedeni ile bir cisim içerisinde depolanan potansiyel enerji olup, birim normal ve makaslama deformasyonlarını oluşturabilmek için yapılması gereken iş'e eşittir.

Birim şekil değiştirme enerjisi, mekanikteki temel kavramlardan biri olup, prensipleri de malzemelerin uygulanan kuvvetlere karşı gösterdikleri tepkinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Spesifik enerji, birim hacimdeki kayacı kazmak için yapılan iş'tir. Gerçeği temsil eden bir ortamda tespit edilmeleri durumunda, kesme veriminin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir ölçüttür. Özellikle tünel açma ve yol kazı makineleri tarafından kayaç kazılabilirliği için ölçülmesinde

anamlı ve gerçekçi ilişkiler sunar (Fowell ve Pycroft 1980). Spesifik enerji, ayrıca, açık işletmelerde kullanılan kazı makinelerinin performanslarının tahmin edilmesi için önemli bir göstergedir (Koncağül 1997).

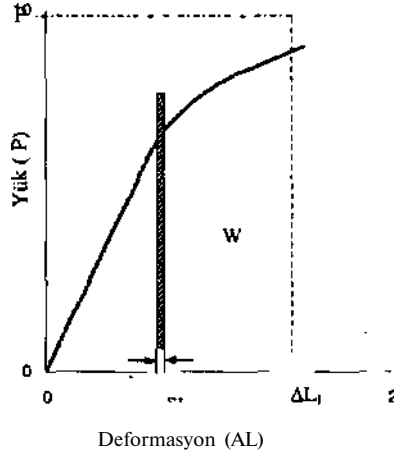
Spesifik enerji ile kayaçların dayanımı (Başarı ve Karpuz 2004) ve birim şekil değiştirme enerjisi arasında (Thuro ve Spaun 1996, Ersoy 2003) anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Ancak, araştırmacıların çoğu, birim deformasyon enerjisini hesaplarken, yalnızca Gerilme - Birim Deformasyon ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrilerinden faydalanmakta ve eğrinin doğrusal olduğunu kabul ederek, eğrinin altında kalan alanı integral yöntemi ile hesaplayıp, çıkan değeri birim deformasyon enerjisi olarak kabul etmektedir.

Bu çalışmada 20 farklı kayaç türünden alınan numune üzerinde birim deformasyon enerjisinin belirlenmesi amacı ile deneyler yapılmış ve elasto-plastik özelliğe sahip olan kayaçlarda birim deformasyon enerjisinin belirlenmesinde Simpson yönteminin, integral yöntemine göre daha sağlıklı sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

## 2 BİRİM DEFORMASYON ENERJİSİ

Boyu L kadar olan sİHndirik bir numunenin üzerine bir P yükü uygulandığında; yükün belli bir değere ulaşması durumunda, numunenin boyunda AL kadar bir değışim ortaya çıkar (Şekil 1).

Numune üzerine tedrici olarak uygulanan P yükü tarafından yapılan İş, şekil değıştirme ile bir miktar enerji artışına neden olur. Bu enerji, numunenin şekil değıştirme enerjisi olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1. Elastik bir cisim için Yuk-Deformasyon grafiği.

Yük tarafından yapılan iş, P-AL grafiğindeki eğrinin altında kalan alana eşittir. Uygulanan yük arttıkça, ortaya çıkan şekil değıştirmeler numunedeki enerjinin artışına neden olur. Bu enerji, yük altında şekil değıştirmenin bir sonucu olarak numune tarafından tutulan enerjidir. Bu durumda numunenin boyunu 5L kadar değıştirmek için yapılacak iş veya gerekli enerji, P.5L dikdörtgeninin alanına eşittir.

$$dw = P \cdot \delta L \quad (2.1)$$

Başlangıçtan itibaren AL kadar bir boy değışimi sağlamak için yapılan toplam iş aşağıda verilen eşitlikle hesaplanabilir:

$$W = \int_0^{AL} P \cdot \delta L \quad (2.2)$$

Burada W; numunenin boyunu  $\Delta L$  kadar değıştirebilmek için gerekli iş (N.m), P; uygulanan yük (N),

AL; boyda meydana gelen değışim (m) dir.

$P = a \cdot A$  ve  $\delta L = L \cdot d\epsilon$  İfadeleri imegralde yerine konulursa;

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma \cdot A \cdot L \cdot d\epsilon \quad (2.3)$$

Hacimde meydana gelen değışiklik İhmal edilebileceği için,  $\Delta X = V_0 = V$  terimi (2.3) eşitliğinde yerine konulursa;

$$W = \int_0^{\epsilon} V \cdot \sigma \cdot d\epsilon \quad (2.4)$$

Her iki taraf V ye bölünerek birim hacimde sarf edilen enerji;

$$w = \int_0^{\epsilon} \sigma \cdot d\epsilon \quad (2.5)$$

olarak hesaplanabilir. (2.5) eşitliğinden görülebileceği gibi; bir cismin birim hacminde  $\epsilon$  kadar bir birim boy değışimi meydana getirebilmek için kullanılan şekil değıştirme enerjisi a - e grafiğindeki eğrinin altında kalan alana eşittir. Tokluk; birim hacimdeki cismi kırabilmek için gerekli enerji (Onaran 1995) olarak tanımlandığına göre;

$$w_k = \int_0^{\epsilon_k} \sigma \cdot d\epsilon \quad (2.6)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Bu da a - e grafiğindeki eğrinin altında kalan toplam alana eşittir. (2.6) eşitliğinin integral! alınırsa;

$$w = \frac{\sigma \cdot \epsilon}{2} \quad (2.7)$$

bulunur. Doğrusal (lineer) elastik cisimler için  $\epsilon = CT / E$  değeri (2.7) eşitliğinde yerine konulursa;

$$w = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} \quad (2.8)$$

olur. Aynı şekilde, (2.8) eşitliğinde,  $\sigma = E \cdot \epsilon$  yerine konulursa;

$$w = \frac{E \cdot \epsilon^2}{2} \quad (2.9)$$

elde edilir. Bu bağıntı bir cisimde plastik şekil değiştirme olmaksızın depo edilebilecek en yüksek elastik şekil değiştirme enerjisini ( $MI / m^3$ ) verir.

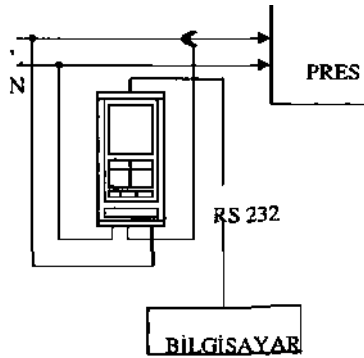
### 3 MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1 Malzeme

Kayaçların şekil değiştirme enerjisinin belirlenmesi amacı ile yapılan deneylerde 42 mm çapında ve boy / çap oranı 2,0 - 2,5 arasında olan mağmatik, metamorfik, sedimanter ve volkanik kayaçlardan alınan silindirik karotlar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kayaçlar Çizelge 1'de verilmektedir. Numunelerin kırılmasında ELE 3000 kN hidrolik pres, şekil değiştirmelerin ölçülmesinde deformasyon ölçer ve numunelere yük uygulanması sırasında presin kullanmış olduğu gücün belirlenmesinde NANOVIP PLUS adlı güç analizörü kullanılmıştır.

#### 3.2 Yöntem

Kaya örneklerinden alınan karotlar, alt ve üst yüzeyleri düzeltildikten sonra, prese yerleştirilmiştir. Uygulanan yükün artırılması sırasında numunede oluşan boy değişimlerinin belirlenmesi amacı ile deformasyon ölçer kullanılmış ve belli aralıklarla uygulanan yük ve oluşan boy değişimleri kaydedilmiştir. Yükleme hızı her kayaç türü için 0,36 MPa/Sn olacak şekilde ayarlanmış tu. Eş zamanlı olarak, Şekil 2'de görüldüğü gibi, presi çalıştıran motorun elektrik kablolarına bağlanan NANOVIP PLUS adlı güç analizörü yardımı ile makine tarafından kullanılan güç ve numune kırılıncaya kadar geçen süre kaydedilmiştir. Cihaz tarafından ölçülen veriler, RS 232 bağlantısı ile, bilgisayardaki, Nanolink yazılımına aktarılmıştır.



Şekil 2. Güç ölçerin (NANOVIP) makineye bağlanması.

Her bir numune için, kaydedilen yük değerlerinin numune kesit alanına bölünmesi ile gerilme ( $\sigma$ ) ve deformasyon değerlerinin numune boyuna bölünmesi ile birim deformasyon ( $\epsilon$ ) değerleri elde edilmiş ve bu değerlerden yararlanılarak. Gerilme - Birim deformasyon grafikleri çizilmiştir. Ayrıca, numunelere yük uygulanması sırasında ölçülen ortalama güç ( $w$ ) ve numune kırılıncaya kadar geçen süre (saniye) nın çarpılması ile numunenin kırılması için gerekli enerji joule cinsinden hesaplanmıştır.

Numuneleri kırmak için kullanılan elektrik enerjisi, numune kesit alanına bölünerek, boyu sabit bir kayaç numunesinin her bir m<sup>3</sup> sini kırmak için gerekli enerji (MJ/m<sup>3</sup>) hesaplanmıştır.

Daha sonra, (2.7) eşitliği kullanılarak, c-E eğrisi altında kalan alan integral yöntemi ile hesaplanmıştır. Son olarak, Simpson yöntemine göre alan hesabı yapabilen bir bilgisayar yazılımı kullanılarak eğri altında kalan alan hesaplanmıştır. Daha sonra (2.7) eşitliği ile hesaplanan alanların Simpson yöntemi ile hesaplanan alan ile ilişkileri ve birim deformasyon enerjisi ile gerçek enerji arasındaki ilişkiler belirlenmiştir.

### 4 ARAŞTIRMA BULGULARI

Farklı kayaç türleri üzerinde, kayaçların mekanik Özelliklerine bağlı olarak, kırılma ve şekil değiştirme enerjilerinin belirlenmesi amacı ile yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 1'de verilmektedir. 1. sütunda; kayaç adı, 2. sütunda kayacın tek eksenli basınç dayanımı, 3. sütunda elastisite modülü ve 4. sütunda kırılma anındaki birim deformasyon değerleri verilmektedir. 5. sütunda numune kırılıncaya kadar makinenin kullandığı enerji (jul) ve 6. sütunda sabit boydaki kayaç numunesinin her bir m<sup>3</sup> sini kırmak için gerekli enerji ( $\epsilon$ ; MJ / m<sup>3</sup>) verilmektedir. 7. sütunda her bir numune için 0 -  $\epsilon$  grafiğindeki eğrinin altında kalan alanın Simpson yöntemi ile hesaplanmış değerleri ve 8. sütunda (2.7) eşitliği ile hesaplanan birim deformasyon enerjisi değerleri verilmektedir. 9. sütunda Simpson yöntemi ile hesaplanan değerlerin birim deformasyon enerjisine oranı verilmektedir. 10. ve 11. sütunlarda, sırasıyla, (2.8) ve (2.9) eşitlikleri ile hesaplanan birim deformasyon enerjilerinin değerleri verilmektedir.

Çizelge 1 ve Şekil 3 birlikte incelendiğinde, doğrusal-elastik davranış özelliği göstermeyen kayalar için birim deformasyon enerjisi veya dolaylı olarak spesifik enerji hesaplanırken integral yöntemi kullanmanın doğru sonuçlar vermediği görülmektedir. Kayaların hemen tamamı elasto-plastik davranış gösterdiklerinden, grafiğin eğimi

doğrusal olmayıp, 2. derece veya polinom şeklinde olmaktadır. 2. dereceden bir eğriye sahip olan grafikte, eğri altında kalan alanın hesaplanması

sırasında Simpson yönteminin doğruya daha yakın sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu nedenle;

Çizelge 1. Kayaçların mekanik özellikleri, kırılma ve şekil değiştirme enerjileri

Kayaç Adı	$\sigma_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$\epsilon_{m}$	Enerji (Jul)	$\frac{e}{(MJ/m^2)}$	$\frac{w}{Alan}$	$\sigma_c \cdot \epsilon_{m} / 2$	$AI/\sigma_c \cdot \epsilon_{m} \cdot E_c$	$\sigma^2 / (2 \cdot E)$	$E \cdot \epsilon^2 / 2$
Gabro	272	36510	0,0091	185298	133,75	1,044	1,237	0,84	1,012	1,512
Gabro	245	36634	0,0091	166313	120,04	1,169	1,116	1,05	0,821	1,517
Gabro	225	36000	0,0077	148461	107,16	0,801	0,868	0,92	0,706	1,067
Kuarsit	219	18773	0,0128	144672	104,42	1,308	1,400	0,93	1,275	1,538
Kuarsit	176	28750	0,0063	121942	88,02	0,524	0,553	0,95	0,537	0,571
Kuarsit	171	33724	0,0051	114688	82,78	0,442	0,436	1,01	0,434	0,439
Kuarsit	162	28433	0,0048	113269	81,76	0,390	0,389	1,00	0,462	0,328
Kuarsit	153	26300	0,0084	105228	75,95	0,681	0,641	1,06	0,443	0,928
Ku m t a ş i	150	31000	0,0078	116594	84,16	0,577	0,583	0,99	0,361	0,943
Damarlı Kçt	149	51697	0,0037	98344	70,98	0,209	0,276	0,76	0,215	0,354
Bazali	148	24111	0,0072	10046Ç	72,52	0,528	0,532	0,99	0,453	0,625
Kuarsit	147	22500	0,0066	101273	73,10	0,468	0,486	0,96	0,482	0,490
Kurması	132	36167	0,0047	92232	66,57	0,328	0,311	1,06	0,242	0,399
Bazali	129	27125	0,0056	85432	61,66	0,342	0,362	0,95	0,308	0,425
Damarlı Kçt	128	26484	0,0044	87360	63,06	0,226	0,281	0,81	0,307	0,256
Siyah Kçt	127	36330	0,0051	85367	61,62	0,323	0,325	0,99	0,223	0,472
Bazali	127	32879	0,0044	85270	61,55	0,251	0,280	0,90	0,246	0,318
Bazalt	113	21870	0,0054	75235	54,30	0,295	0,305	0,97	0,292	0,319
Dolerit	112	39000	0,0039	84512	61,00	0,196	0,218	0,90	0,160	0,297
Kuarsit	105	19880	0,0054	73041	52,72	0,263	0,283	0,93	0,277	0,290
Kuarsil	102	22850	0,0047	67748	48,90	0,212	0,239	0,89	0,227	0,252
Damarlı Kçt	95	28472	0,0053	64626	46,65	0,254	0,252	1,01	0,158	0,400
Kumlası	94	21493	0,0081	60270	43,50	0,397	0,381	1,04	0,206	0,705
Riyolit	93	10286	0,0123	63679	45,96	0,423	0,569	0,74	0,416	0,778
Siyah Kçt	90	27000	0,0044	60182	43,44	0,179	0,198	0,91	0,150	0,261
Çakıl taşı	88	33419	0,0051	62304	44,97	0,188	0,225	0,84	0,116	0,435
Dolerit	88	41300	0,0026	63452	45,80	0,122	0,114	1,06	0,094	0,140
Çakıl taşı	82	22238	0,0061	56162	40,54	0,201	0,250	0,81	0,151	0,414
Çakıl taşı	69	17491	0,0073	46555	33,60	0,241	0,251	0,96	0,135	0,466
Riyolit	66	8308	0,011	43906	31,69	0,274	0,364	0,75	0,264	0,503
Riyolit	55	9000	0,0093	35601	25,70	0,201	0,253	0,79	0,165	0,389
Riyolit	52	10900	0,008	33781	24,38	0,167	0,208	0,80	0,124	0,349
Traverten	45	9909	0,0052	30923	22,32	0,111	0,118	0,94	0,104	0,134
Traverten	41	5214	0,0075	27480	19,83	0,150	0,152	0,98	0,158	0,147
Siyah Tiif	39	6412	0,0081	24715	17,84	0,151	0,158	0,95	0,119	0,210
Siyah Tiif	36	1090	0,007	22341	16,13	0,121	0,127	0,95	0,604	0,027
Siyah Tiif	36	7200	0,0066	22966	16,58	0,134	0,119	1,13	0,091	0,157

(2.7), (2.8) ve (2.9) eşitlikleri ile hesaplanan birim deformasyon enerjilerinden hangisinin doğruya daha yakın olduğu araştırılmış ve (2.7) eşitliği ile hesaplanan alanın birim deformasyon enerjisine en yakın değer ( $R^2 = 0,98$ ) olduğu görülmüştür.

Şekil 4'ten de görülebileceği gibi, kayaçların kırılabilmesi için kullanılan enerji ile tek eksenli basınç dayanımları arasında, aşağıdaki eşitlikte de görüldüğü gibi, tam bir ilişki vardır:

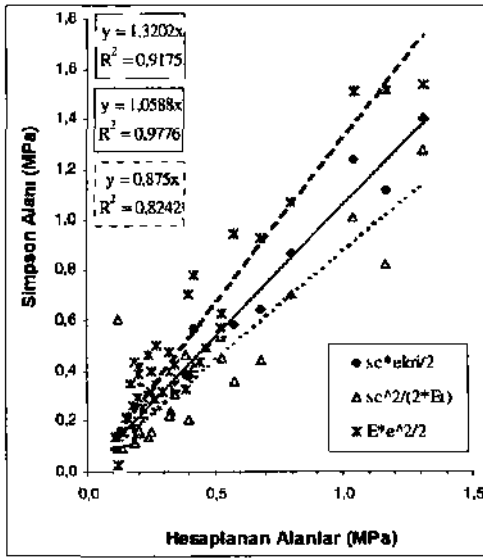
$$e = 0,4907 \cdot G_L; \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.1)$$

Burada e= belli uzunluktaki kayacın 1 m<sup>2</sup> sini kırabilmek için gerekli enerji (MJ / m<sup>2</sup>),

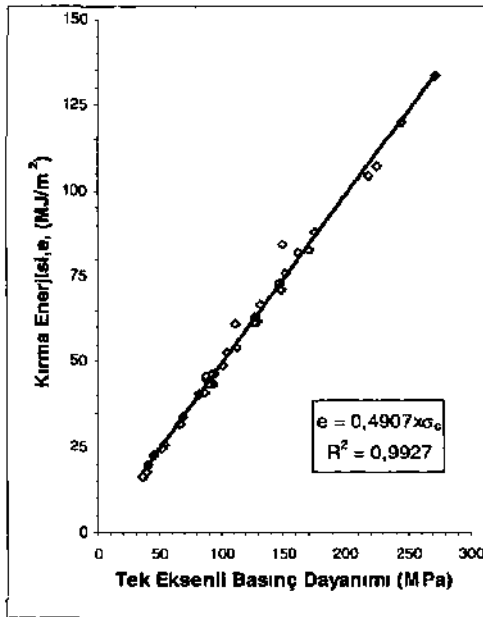
$G_L$  = kayacın tek eksenli basınç dayanımı (MPa).

Şekil 5'ten de görülebileceği gibi, kayaçların birim deformasyon enerjileri ile kırma enerjileri arasında tam bir ilişki mevcut değildir. Bunun nedeni Şekil 6 incelendiğinde daha açık bir şekilde görülebilmektedir. Şekil 6'da O' - E eğrisi altında kalan ve birim deformasyon enerjisi olarak tanımlanan, alanları hemen hemen eşit olan, ancak dayanımları farklı olan kayaçlar görülmektedir. Buna göre; düşük dayanım ve yüksek deformasyon yeteneğine sahip olan kayaçlar ile yüksek dayanım ve düşük deformasyon yeteneğine sahip kayaçlar aynı birim deformasyon enerjisine sahip olmaktadır.

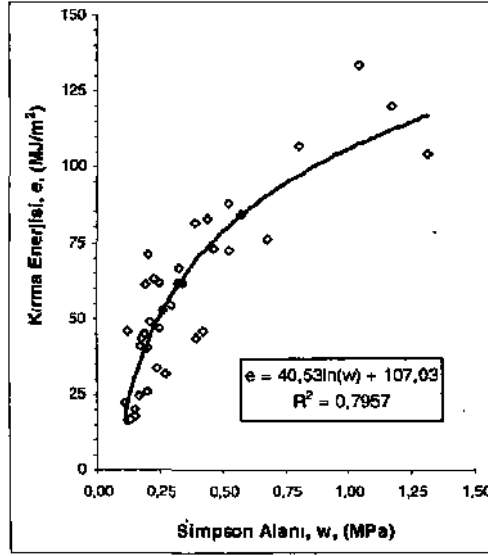
Oysa, Şekil 4'ten de görüldüğü gibi, kırılmalar için kullanılan enerjiler birbirlerinden farklıdır.



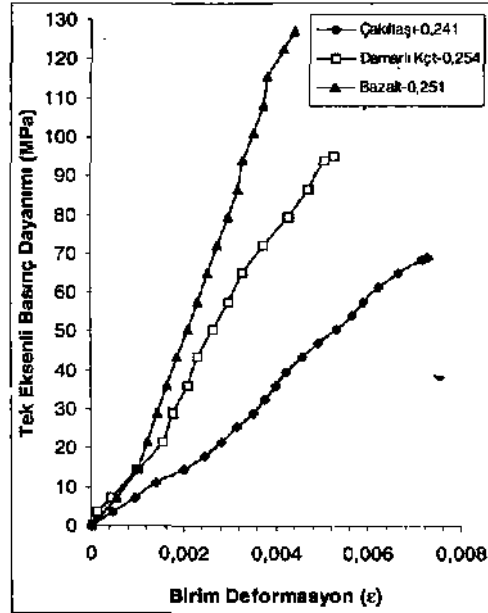
Şekil 3. Simpson alanı ve hesaplanan şekil değiştirme enerjileri arasındaki ilişkiler.



Şekil 4. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımına bağlı olarak gerekli kırma enerjileri.



Şekil 5. Simpson yöntemi ile hesaplanan alan ve gerçek kırma enerjisi arasındaki ilişki.



Şekil 6. Parklı dayanımlara sahip kayaçların Gerilme-Birim Deformasyon eğrileri ve Birim deformasyon enerjileri.

Elastik bölge sonunda plastik şekil değiştirmeden, ani olarak kırılan gevrek malzemelerde, a - E eğrisi doğrusal olduğu için kırılma enerjisi ile birim deformasyon enerjisi arasında anlamlı ilişkiler kurulabilir. Ancak, önemli miktarda plastik deformasyondan sonra, büzülerek kırılan sünek malzemelerin kırılma enerjileri belirlenirken birim deformasyon enerjileri anlamlı ilişkiler vermemektedir.

## 5 SONUÇLAR

Kayaçların şekil değiştirme enerjileri ile kazı, delme veya kırma enerjileri arasında ilişkiler belirlenirken, integral yöntemi yerine, a-f eğrisi altında kalan alanın Simpson yöntemi ile belirlenmesi doğruya daha yakın sonuçlar vermektedir.

Kayaçların tek ek?enli basınç dayanımları ile kırılmaları için gerekli enerji arasında tam bir ilişki mevcuttur.

Doğrusal-etastik özelliğe sahip olmayan kayaçlar için şekil değiştirme enerjisi ile kayacın kırılması için gerekli enerji arasında anlamlı bir ilişki bulunmamaktadır.

Yüksek dayanım ve düşük deformasyon yeteneğine sahip kayaçlar ile düşük dayanım ve yüksek deformasyon yeteneğine sahip kayaçların şekil değiştirme enerjileri eşit olabilir. Ancak, kırılabilimleri için gerekli enerji farklıdır.

Gerilme-Birim Deformasyon eğrisi çizildiğinde, sekant, tanjant ve ortalama elastisite modülleri birbirine yakın olan kayaçlar, lineer elastik davranış özelliğine yaklaştıklarından, şekil değiştirme

enerjileri ile dayanımları arasındaki ilişkiler anlamlı olabilir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmayı maddi olarak destekleyen Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür eder. No. FBE.2004.YL.1.

## KAYNAKLAR

- Başarı, H., Karpuz, C. 2004; A rippability classification system for marls in lignite mines, *Engineering Geology* (yayımda).
- Ersoy, A., 2003; Automatic drilling control based on minimum drilling specific energy using PDC and WC bits. *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, Section A, Vol. 113, pp: 86-96.
- Fowell, R. J., Pyrcroft, A. S., 1980; Rock mechaniability studies for the assessment of selective tunnelling machine performance. In; Summers, D. (Ed.), *Proc. U. S. MecluinicsSymp..2V\Ralla,MO*,pp. 149-158.
- Koncagul, O., 1997; Diggability assessment of bucket wheel excavators in Elbistan Lignite Mines, *Ph D thesis*, METU, Ankara, Turkey.
- Onaran, K. 1995; Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Thuro, K., Spaun, G., 1996; Drillability in hard rock drill and blast tunnelling, *Felsbau* 14, 103-109.

## Kayaçların Cerchar Sertlik İndeks Değerleri İle Dayanım Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Belirlenmesi

O. Yaralı & N. A. Akçın,

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

**ÖZET:** Bu çalışmada, Zonguldak Taşkömür Havzası kayaçlarının sertliklerini ve mekanik özelliklerini belirlemek için laboratuvarında bir dizi deneyler yapılmıştır. Kayaçların Cerchar sertlik İndekslerinin bulunabilmesi için modifiye edilmiş bir deney düzeneği kullanılmıştır. İki farklı uç açısına sahip matkap uçlarla kayaçların sertlikleri belirlenmiş ve Cerchar sertlik indeks değerlerine uç açısı etkisi araştırılmıştır. Cerchar sertlik indeks değerleriyle kayaç örneklerinin mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir.

**ABSTRACT:** In this study, series of experiments were performed in laboratory to determine hardness and mechanical properties of some rock types found in Zonguldak Hard Coal Basin. A modified experimental apparatus was used to measure Cerchar hardness index of rocks. The hardness of rocks were determined by drill bits having two different tip angles and the effect of drill bit tip angle on Cerchar hardness index values was investigated. Finally, correlations between Cerchar hardness index and the mechanical properties of rocks were assessed.

### 1. GİRİŞ

Sertlik, sözlük anlamı olarak, "bir cisim kolay delinmiyorsa o cisim sert olarak" tanımlanmaktadır. Sertlik, malzemenin temel fiziksel bir özelliğinden ziyade malzemenin davranışını açıklayan bir kavram şeklinde ifade edilmektedir. Sertlik, elastisite modülünün, malzemenin yenilme gerilmesinin, çatlak tokluğunun, malzemenin plastik veya gevreklik durumunun ve yüzey enerjisinin bir fonksiyonudur (Atkinson 1993).

Kayaçların sertliği üç deney yöntemiyle bulunmaktadır. Bunlar; çizme sertlik (Mohs sertlik) deneyi, dinamik veya geri sekme (Schmidt çekici ve Shore sertlik) deneyi ve batırma (Vickers, Knoop, Brinnell sertlik) deneyidir (Atkinson 1993).

Batırma sertlik deneyi taboraluar deneyidir ve bu deney, sadece küçük hacimdeki kaya örnekleri üzerine belirli yükler uygulanarak batma derinliği ölçülerek bulunur (Atkinson 1993).

Standart bir batırma deneyi tek eksenli basınç dayanımını tahmini belirlemede önerilen bir sertlik ölçüm deneyidir. Bu deney yönteminde örnek hazırlamak daha kolaydır ve karmaşık olmayan

deney ekipmanları yeterli olmaktadır. Ayrıca, tek eksenli basınç dayanım deneyine göre çok daha kolay, daha hızlı ve çok ekonomik olarak yapılabilen deneylerdir (Szwedzicki 1998).

Günümüz şartlarında; galeri açma makinalarının performansının ve uç tüketiminin önceden kestirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla çeşitli araştırmacılar uzun yıllar boyunca çalışmalar yapmış ve yeni yöntemler geliştirmişlerdir. Bu yöntemlerden biri de Cerchar sertlik indeks (CSI) deneyidir. Cerchar sertlik deneyi batırma sertlik deneyi sınıfında yer almaktadır. Deneyin amacı, kayaçların sertlikleri ile galeri açma makinalarının kazı hızına bağlı olarak kayaçlarının kazı labi liri ikerinin tayin edilmesidir. Ayrıca, Cerchar sertlik indeks deneyi kömür çevre kayaçlarının jeoteknik özellikleri açısından sınıflandırılmasında da kullanılmaktadır (Bilgin 1989).

Uluslararası Kaya Mekanik Derneği (International Society of Rock Mechanics), 3 Eylül 1987 yılında Montreal'de yaptığı toplantıda kaya mekaniğinde kayaçların kesilebilirliği, delinebilirliği ve kazılabilirliği konularında Cerchar aşınma ve

Cerchar sertlik indeks deneylerinin standart kaya mekaniği deneyi olarak uygulanmasını önermiştir (Bilgin 1989).

Zonguldak Havzası kömür çevre kayaçları içinde açılan galerilerin sürülmesinde önemli kazı sorunları vardır. Havza'da yeraltında açılan galeriler, klasik delme-paüalma ve yarı mekanize sistem olan elektro-hidrolik delici-yükleyicilerle açılmaktadır. Havza'da galerilerin sürülmesinde galeri açma makinalarının kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yürütülmektedir (Yaralı 2000).

Daha önce Havza'da kasılabilirlik ve delinebilirlik konularında bazı çalışmalar yapılmıştır. Ancak, galeri açma makinalarının kazı hızlarının ve keski tüketiminin önceden tahmin edilmesine ilişkin araştırmalar sınırlı kalmıştır.

Ceyman (1988), TTK Amasra Müessesesi'nden alınan kömür çevre kayaçları üzerinde Cerchar aşınma ve Cerchar sertlik indeks deneyleri yapmıştır. Cerchar sertlik indeks deneyinde; farklı baskı yükü (15-20-25 kg) ile farklı devirlerde (180-300-500-740-1100 dev/dak) kayaçların sertliklerine bakılmıştır. Bu çalışma Havza'da Cerchar sertlik indeks deney aleti kullanılarak yapılmış ilk çalışma olması açısından önem taşımaktadır ancak, Amasra Bölgesi ile sınırlı kalmıştır.

Türkiye'de Cerchar sertlik indeksi ile yapılmış araştırma sayısı da oldukça azdır. Bilgin vd. (1992) tarafından, TKİ Ege Linyitleri İşletmesi (ELİ) Darkale ve Eyzey yeraltı ocaklarında kömür damarlarının mekanik dayanımları ve kasılabilirlik özelliklerini etkileyen faktörler araştırılmıştır. Bu çalışmada modifiye edilmiş (değiştirilmiş) Cerchar sertlik indeks deney yöntemi kullanılmıştır. Bu deney yönteminde, tepe açısı 90° olan DİN 6039 normunda 8 mm'lik bir delici matkap uç. 500 dev/dak'da dönen sütünkü bir matkapla, 20 kg'lık baskı kuvveti altında kayaç örneklerini bastırılmış ve 1 cm'lik deliğin delinmesi için geçen süre Cerchar sertlik indeks değeri olarak alınmıştır. Eyzey +457 Ayak'tan 5'er m aralıklarla örnekler alınarak Cerchar sertlik indeks deneyi yapılmış ve 24 s ile 132 s. aralığında Cerchar sertlik değerleri okunmuştur. Darkale +285, 102 No'lu Bacadan örnekler alınmış ve Cerchar sertlik indeks deney sonuçlarının 30 s ile 49 s arasında değişliği belirlenmiştir. Darkale +285 Sabanlı Ayaktan 1 m'den 60 m'ye kadar 10'ar m aralıklarla örnekler alınmıştır. Yapılan Cerchar sertlik indeks deney sonuçlarının 32.5 s ile 62 s aralığında değişliği ölçülmüştür.

Çopur & Eskikaya (1992) tarafından TKİ Ege Linyitleri İşletmesi (ELİ) Eyzey bölgesi M2 manimin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Laboratuvar deneyleri göz önünde

bulundurulurak, M2 mamı üzerinde mekanize çalış ı lab ilmesi yönünde bir sınıflama yapılmıştır. Elde edilen bulgulardan yola çıkarak, M2 marnının kazı çalışmaları için uygun galeri açma makineleri seçilmiş ve bu makinelerin kazı performansları tahmin edilmiştir. Bu çalışmada Cerchar sertlik indeks deneyi yapılmış ve deney sonuçlarının 7.2 s ile 32.6 s aralığında değişliği bulunmuştur. Cerchar sertlik İndeks deneyi sonucunda, marn formasyonunun orta sertlik grubuna giren yapısı olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada, Zonguldak Havzası kömür çevre kayaçlarının sertliklerinin belirlenmesi için modifiye edilmiş Cerchar sertlik indeks deney aleti kullanılmıştır. Zonguldak Havzası'nın değişik yerlerinden kayaç örnekleri alınmış ve ZEDEM Uygulamalı Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda kayaç örnekleri üzerinde dayanım deneyleri (tek eksenli basınç ve tek eksenli dolaylı çekme) ile indeks deneyleri (Cerchar sertlik , Shore sertlik, nokta yükü dayanım) yapılmıştır. Cerchar sertlik indeks deneyinde iki farklı tepe açısına (99° ve 125°) sahip matkap uçlar kullanılarak uç açısı etkisi de araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar arasında ilişkiler kurulmaya çalışılmıştır

## 2 CERCHAR SERTLİK İNDEKS DENEYİ

Cerchar sertlik indeks deneyi ilk defa "Charbonnage de France"ın Cerchar Araştırma Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiş ve Valantin tarafından 1974'te yayınlanmıştır.

Bu deney küçük bir delme deneyidir ve 8 mm çapında tungsten karbiden yapılmış her iki yüzeyi dikkatlice bilenmiş uç açısı 99° olan bir matkapla, mengeneye sıkıştırılmış kırık bir kaya örneğine aşağıya doğru düşey konumda delme işlemi şeklinde yapılır (Valantin 1974).

Matkaba dik konumda 20 kg'lık baskı kuvveti uygulanır. Matkap kendi eksenini etrafında yaklaşık 190 devir/dakika dönüş hızında döndürülür ve kayaç içinde delik delirtir. Cerchar sertlik indeks değeri, 1 cm derinlikteki bir deliğin açılma süresinin saniye cinsinden belirlenmesidir (Valantin 1974).

AFTES (Fransa) araştırma laboratuvarında Cerchar sertlik indeksi uygulamasına göre, Cerchar sertlik değeri 40-50'den daha fazla olan çok sert kayaçlarda ilerleme az olduğu için, matkaba 400 N'luk baskı kuvveti uygulanmaktadır. Elde edilen veriler 2'ye bölünerek basitçe düzeltme yapılmaktadır. Çok yumuşak kayaçlarda ise ilerleme çok geniş aralıkta değişliği için, matkaba sadece 70 N'luk baskı kuvveti uygulanmakta ve elde edilen



veriler 3 ile çarpılmaktadır (Cerchar 1991 ; Sofretu & Schwenzfeier'den 2005).

Cerchar sertlik indeks deney sonuçları Çizelge 1'de gösterilen ve 10 İle 150 arasında değişen skalaya göre tanımlanır (Sofretu & Schwenzfeier 2005).

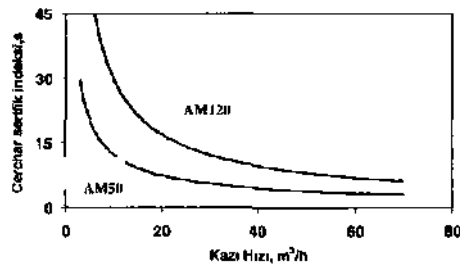
Çizelge 1. Cerchar sertlik indeks tanımlaması (Cerchar 1991; Sofretu & Schwenzfeier'den 2005).

Cerchar sertlik değeri	Tanımlama
0 -20	Yumuşak kayaç
21 - 40	Orta sertlikte kayaç
41-80	Sert kayaç
81-120	Çok sert kayaç
> 120	Oldukça sert kayaç

Bu deney, örnek yüzeyinde belirli bir noktaya uygulandığı için sadece örnek yüzeyini etkiler. Bu sebeple, bu deney birçok defa tekrarlanmalıdır. Sonuçlar verilirken, her bir kayaç tipi için ortalama ve standart sapması ifade edilmelidir (Sofretu & Schwenzfeier 2005).

Sofretu & Schwenzfeier (2005)'e göre, kayacın tek eksenli basınç dayanımıyla Cerchar sertlik indeks deneyi arasında korelasyon kurulmaya çalışılmaktadır. Ancak, elde edilen verilerin dağılımı çok geniştir. Bu sebeple, kayacın tek eksenli basınç dayanımının Cerchar sertlik indeks deneyine bağlı olarak bulunulmasından kaçınılması gerekmektedir. Çünkü, yapılan deney lokal olarak uygulandığı için dayanım her durumda gerçek değerinden çok fazla olabilecektir. Özellikle kayacın dokusunda süreksizliklerin olduğu durumda. Cerchar senlik değeri gerçek durumu yansıtmayabileceği yönünde görüş bildirmişlerdir.

Voest Alpine şirketinin 1987'de ürettikleri AM50 ve AM100 serisindeki kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) kazı hızlarının, kayaçların Cerchar sertliğine bağlı olarak önceden kestirileceği savunmaktadırlar (Şek. 1).



Şekil 1. KGAM'da kazı hızının CSI ile değişimi (Voest Alpine 1987; Bilgin'den 1989).

Coder (1973) tam cepheli tünel açma makinelerinin davranışları üzerine yaptığı araştırmada bu sertlik değerinin kayaçların kazılabilirliklerinin tayininde çok önemli rol oynadığını göstermiştir (Bilgin'den 1989).

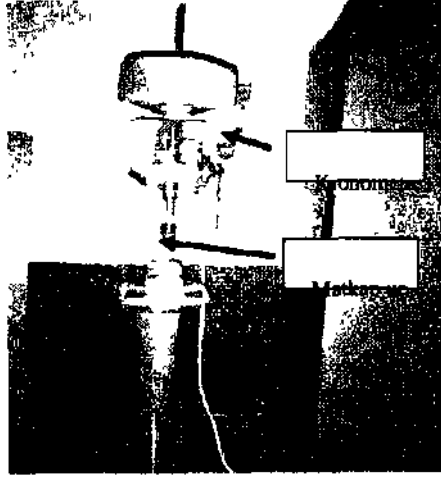
### 3.MODİFİYE EDİLMİŞ CERCHAR SERTLİK İNDEKS DENEY ALETİNİN TANITILMASI

Yaptırılan Cerchar sertlik İndeks deney aleti (Şek. 2-3)190 - 500 - 750 devir/dakika olmak üzere 3 farklı dönüş hızında delik delebilmektedir. İstenilen hızları sağlamak için sütunlu matkap tezgahının üzerine 2.5 kW'lık bir motor bağlanmıştır ve üç aşamalı ayarlanabilir kasnak yaptırılmıştır. Deney aletinin yanında Özel askı düzeneğine yük bağlamak koşuluyla deney örneği üzerine 20 kg'lık (200 N) normal yük verilebilmektedir. İstenildiği takdirde asılı yük miktarı azaltılıp veya çoğaltılarak deney örneği üzerine gelen normal yük değiştirilebilmektedir. Matkabın bağlı olduğu manşon üzerinde delme mesafesini sabitleyen bir düğme bulunmaktadır. Bu düğme ile delinecek mesafe (standartda 1 cm) isteğe göre ayarlanarak sabitlenmektedir.

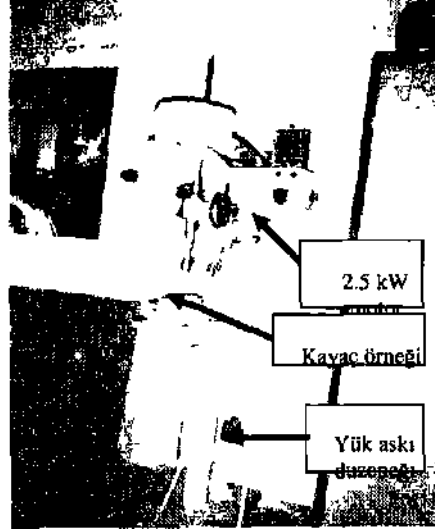
Deney aleti üzerinde yapılan çok amaçlı değişiklikler ile farklı delme mesafelerinde, farklı normal yük altında, farklı delme hızlarında Cerchar sertlik değerinin değişimini inceleme kolaylığı sağlanmıştır.

Delme işlemi için geçen süreyi belirlemek amacıyla deney setine bağlı bir dijital kronometre bulunmaktadır. Dijital kronometre, delik delme işlemi tamamlandıktan sonra delme işlemi otomatik kesen bir anahtara bağlıdır. Böylece,, belirlenen delme mesafesine göre delme süresi net olarak saptanabilmektedir.

Cerchar senlik indeks deneyinde kullanılan matkap uç DİN 8039 normunda olup, uç aşınmaya dayanıklı tungsten karpitten imal edilmiş ve uç açısı 99° 'dir. İstenilen standartlarda 99° lik uç bulunamamışın'. Bunun yerine aynı standartta (DİN 8039) uç açısı 125° olan uç kullanılmıştır. Uçların bir kısmı İstanbul'da özel bir ailyede uç açısı 99° olacak şekilde bilenmiştir.



Şekil 1. CSI deney aletinin önden görünüşü.



Şekil 2. CSI deney aletinin yan çaprazdan görünüşü

#### 4. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada, Türkiye Taşkömürleri Kurumu (TTK)'na bağlı değişik Müesseselerden (Üzülmez, Amasra, Karadon) ve Ozbeyler Madencilik Şirketi'nin Gelik İşleminde'nden kömür çevre kayaçlarını karakterize edecek şekilde, kumtaşı ve silttaşı kayaç blok örnekleri alınmıştır. Ayrıca, ZKU Üniversite Hastanesinin bulunduğu iki farklı yerden ve Üniversite Ana Kampus yakınından kireçtaşı kayaç blok örnekleri ile Devrek'te Maden Tetkik ve Arama'nın (MTA) eski kampının bulunduğu yerden

dolomit örnekleri alınmıştır. Kayaç blok örneklerinin alındığı yerler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Örnek alım verileri.

No	Yer	Örnek Adı
1	TTK Karadon Mües.	İnce taneli kumtaşı
2	TTK Karadon Mües.	Orta taneli kumtaşı
3	Ozbeyler Madencilik	İnce taneli kumtaşı
4	TTK Üzülmez Mües.	İnce taneli kumtaşı
5	TTK Üzülmez Mües.	İnce taneli kumtaşı
6	TTK Üzülmez Mües.	İri taneli kumtaşı
7	TTK Üzülmez Mües.	Silttaşı
8	TTK Amasra Mües.	Silttaşı
9	Ozbeyler Madencilik	Silttaşı
10	ZKU Hastanesi	Kireçtaşı
11	ZKU Hastanesi	Kireçtaşı
12	ZKU Ana Kampus yakını	Kireçtaşı
13	Devrek	Dolomit

Gerek örneklerin alınmasında gerekse laboratuarda deneylerin yapılmasında Uluslararası Kaya Mekanikliği Demeyi (International Society of Rock Mechanics) (İSRM 1980) standartlarına uyulmuştur.

Dayanım deneylerinde "NX" (= 54 mm) çapında karot örnekleri üzerinde çalışılmıştır. Dayanım ve indeks deneylerinde standartlara uygun olmayacak şekilde kırılan örnekler göz önüne alınmamıştır. Ayrıca, deneylerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde, verilerin birbiriyle olan uyumlarına istatistiksel olarak da bakılmıştır. Bunun için Chauvenet ölçütü uygulanmıştır (Holman & Gajda 1984).

Cerchar sertlik indeksi deneyi Valantin (1974) önerdiği şekilde yapılmıştır. Cerchar sertlik indeksi deneyinde her bir kayaçtan en az 2 prizmatik örnek hazırlanmıştır. Cerchar sertlik indeksi deneyi yapılmadan önce her prizmatik örneğin Shore sertlik değeri belirlenmiştir. Her iki deneyde kayacın sertliği ile ilgili bilgi vermektedir. Bu iki sertlik indeksi deney yöntemi arasında ilişki kurularak Cerchar sertlik indeksi deneyinin güvenilirliğini araştırma imkanı bulunmuştur.

Bu çalışmada, uç açısının etkisi de araştırılmıştır. Prizmatik örneklerin karşılıklı İki yüzeyine hem 125° hem de 99° lik matkaplarla birer delik delinmiştir. Böylece bir prizmatik kayaç örneği için her bir matkap uca ait 2 adet Cerchar sertlik indeksi değeri elde edilmiştir. Her bir örnek yüzeyinin Cerchar sertlik indeksi değeri belirlenirken yeni matkap kullanılmıştır. 23 adet prizmatik kayaç örneğinin Cerchar sertlik indeksi değeri belirlenmiştir. Sadece, TTK Asma İşleminde'nden alınan ince taneli kumtaşı örneği ne 125° ne de 99° lik

matkapla delinmemiştir. Bunun sebebi, örnek içinde aşındırıcı mineralin (kuvars oranı %80) fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Cerchar sertlik indeks deneyi için 46 adet 125° lik 46 adet 99° lik matkap uç harcanmıştır.

Shore sertlik indeks deneyi prizmatik kayaç örnekleri üzerinde en az 5 mm aralıkla 22 okuma yapılmıştır. Okumalardaki en düşük ve en yüksek değerler atılmış ve okumaların ortalaması alınmıştır (ISRM 1977).

Bu çalışmada her kaya örneği için çapsal ve eksenel nokta yükü dayanımı İndeks deneyleri ISRM (1985) standardına göre yapılmıştır. Her kaya için deney 7 ile 10 kez tekrarlanmıştır.

Bu çalışmada, silindirik şekle sahip kayaç malzemesi örneklerinin tek eksenli basınç dayanımının tayininde ISRM (1979) tarafından önerilen yöntemi izlenmiştir. ISRM tarafından önerilen standartta, yükseklik/çap (H/D) oranı 2.5-3.0 olması istenirken, kaya bloklarının kalınlıkları yeterli olmadığı için H/D oranı 2 olacak şekilde örnekler hazırlanmıştır. Her kaya tipi için deney 5 kez tekrarlanmıştır. Deney, hidrolik preste ve ortalama 0.5 MPa/s yükleme hızında yapılmıştır.

Disk şeklinde hazırlanmış kayaç örneklerinin çapsal yükleme altında çekme dayanımlarının dolaylı olarak tespiti için, ISRM (1978) tarafından önerilen deney yöntemi uygulanmıştır. Yapılan deneylerde H/D oranı 0.5 olacak şekilde örnekler hazırlanmış, örneklerin alt ve üst yüzeyleri kabaca düzeltilmiştir. Her bir kaya örneği için 10'ar adet deney yapılmıştır. Örneklerin yenilmesi 20-35 saniye arasında gerçekleşmiştir. Laboratuvarda yapılan deneysel çalışmaların sonuçları Çizelge 3'de gösterilmiştir

## 5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Elde edile sonuçların yorumlamaları aşağıda verilmiştir.

- Kayaçların tek eksenli basınç dayanım deney sonuçları ISRM (1980)'e göre tanımlandığında; kumtaşı ( $\sigma_c = 72-103$  MPa) ve kireçtaşı ( $\sigma_c = 87-120$  MPa) örneklerinin yüksek dayanım sınıfında, silttaşı ( $\sigma_c = 58-61$  MPa) ve dolomit ( $\sigma_c = 60$  MPa) örneklerinin ise orta dayanım sınıfında olduğu belirlenmiştir.
- İncelenen kayaçların tek eksenli basınç dayanım değerleri kireçtaşı haricinde 56 ile 100 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Tamrock (1999)'a göre bu kayaçların kazısında orta tip

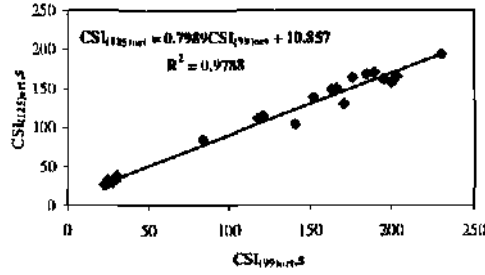
kollu galeri açma makinasının ( $\sigma_c = 80-100$  MPa) kullanılabilir olduğu söylenebilmektedir.

- Kayaçların tek eksenli dolaylı çekme (Brazilian) dayanım deney sonuçlarına bakıldığında; kumtaşı örneklerinin 6-9.5 MPa arasında, silttaşı örneklerinin 6-8.6 MPa aralığında, kireçtaşı örneklerinin yaklaşık 8.5 civarında ve dolomit örneğinin ise yaklaşık 6 MPa olduğu saptanmıştır.
  - Kayaçların Cerchar sertlik indeks deneyinde iki farklı tepe açısına sahip matkap uç kullanılmıştır. 99° lik tepe açısına sahip matkap uçla yapılan Cerchar sertlik deneyinde; kumtaşı örneklerinin 84-189 s aralığında, silttaşı örneklerinin 22-31 s aralığında, kireçtaşı örneklerinin 152-183 s aralığında ve dolomit örneklerinin ise 195-203 s aralığında delik delinmiştir. 125° lik tepe açısına sahip matkap uçla yapılan Cerchar sertlik deneyinde; kumtaşı örneklerinin 82-170 s, silttaşı örneklerinin 26-38 s, kireçtaşı örneklerinin 138-169 s ve dolomit örneklerinin ise 158-165 s aralığında delik delinmiştir. İncelenen kayaçların Cerchar sertlik indeks deneyi sonucunda, kumtaşı örneklerinin (82-189 s) çok sert-olukça sert, silttaşı örneklerinin (22-38 s), kireçtaşı örneklerinin (13-183 s) ve dolomit örneklerinin (158-203 s) oldukça sert grubuna girdikleri belirlenmiştir.
  - Kayaç örneklerinin nokta yükü dayanım indeks deneyleri hem çapsal hem de eksenel olarak yapılmış ve ISRM (1985)'e göre anizotropi indeks tanımlaması yapılmıştır. Buna göre; kumtaşı örneklerinin izotropik ve yarı anizotropik olduğu, silttaşı ve kireçtaşı örneklerinin anizotropik, dolomit örneklerinin ise yarı izotropik olduğu saptanmıştır.
  - Shore sertlik İndeks deney sonuçları incelendiğinde, kumtaşı örneklerinin Shore sertlik değerinin 34-45, silttaşı örneklerinin Shore sertlik değerinin 23-29 arasında, kireçtaşı örneklerinin Shore sertlik değerinin 34-44 arasında, dolomit örneklerinin Shore sertlik değerinin 30-33 arasında değişliği bulunmuştur.
- Laboratuvar çalışmaları sonucu elde edilen değerler arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır.

### 5.1 İki farklı tepe açılı matkap uçları arasındaki ilişki

Cerchar sertlik indeks deneyinde iki farklı tepe açısına (99° ve 125°) sahip matkap uçları kullanılarak uç açısı etkisi araştırılmıştır. Şekil 3'de

iki farklı tepe açısına sahip matkap uçlarla yapılan Cerchar sertlik deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Bu iki büyüklük arasında doğrusal bir ilişki elde edilmiştir ( $R^2 = 0.98$ ).

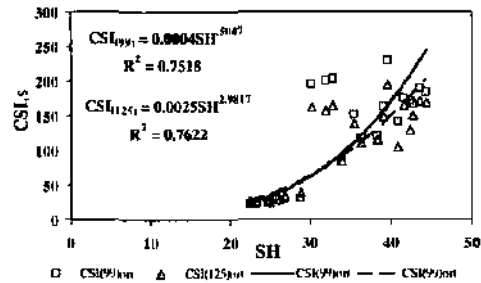


Şekil 3. CSI deneyinde kullanılan iki farklı tepe açısıyla yapılan deney sonuçları arasındaki ilişki.

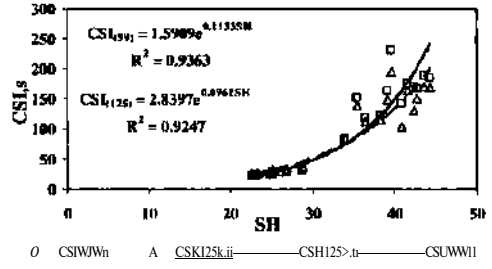
Cerchar sertlik indeksi deneyinde,  $99^\circ$  lik matkap uç yerine  $125^\circ$  lik matkap uç kullanıldığında sonuçlarda önemli farklılıkların olmayacağı belirlenmiştir.

### 5.2 Shore ile Cerchar sertlik indeksleri arasındaki ilişkisi

Kayaçların Shore sertlik indeksi (SH) değerleri ile hem  $99^\circ$  hem de  $125^\circ$  tepe açısına sahip matkap uçlar ile yapılan Cerchar sertlik indeksi (CSI) değerleri arasında dolomit örnekleri katıldığında Şekil 4'deki, dolomit örnekleri katılmadığında ise Şekil 5'deki gibi ilişkiler kurulmuştur. Buna göre, deney sayısı 13 kayaç örneğiyle sınırlı olmasına rağmen Cerchar sertlik indeksi değeri kayaçların sertliğinin belirlenmesinde kullanılabilecek bir deney yöntemi olarak görülmektedir.



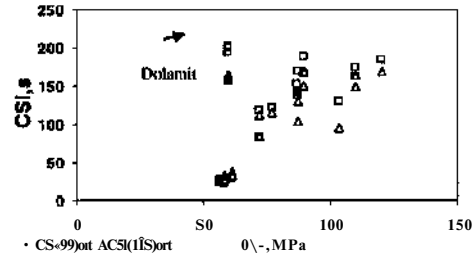
Şekil 4. SH ile CSI arasındaki ilişki (dolomit örnekleri dahil).



Şekil 5. SH ile CSI arasındaki ilişki (dolomit örnekleri hariç).

### 5.3 Tek eksenli basınç dayanımı ile Cerchar sertlik indeksi arasındaki ilişki

İki farklı tepe açısına sahip matkap uçlarla yapılan Cerchar sertlik ortalama indeksi değerleriyle tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ) arasında Şekil 6'da görüldüğü gibi anlamlı bir ilişki elde edilememiştir. Büyüklükler arasındaki ilişkinin zayıf olmasının nedeni dolomit örneklerinden kaynaklanmaktadır.



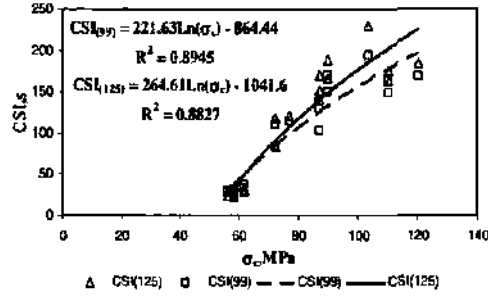
Şekil 6. CSI ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Çizelge 3. Deney sonuçları.

No	(MPa)		CSI,s				Is (Ort.), MPa				SH
	(MPa)	(MPa)	-	Ort.	125'	Ort.	Is/,	Is <sub>sw</sub>	Is,		
1	103.40 ±12.01	6.74 ±1.10	224 236	230	182 207	194.5	7.30	7.56	5.74	5.44	39.60
2.1	89.79 ±9.16	9.24 ±1.22	168 164	166	123 177	150	6.30	6.52	4.53	4.30	42.70
22	89.79 ±9.16	9.24 ±1.22	186 192	189	146 194	170	6.30	6.52	4.53	4.30	43.60
3.1	72.14 ±6.16	6.21 ±0.63	83 85	84	79 89	84	3.73	3.82	3.77	3.64	33.95
3.2	72.14 ±6.16	6.21 ±0.63	112 187	118	110 155	111	3.73	3.82	3.77	3.64	36.40
4.1	87.36 ±20.76	8.71 ±1.40	128 154	141	85 123	104	4.14	4.27	5.75	5.86	40.90
4.2	87.36 ±20.76	8.71 ±1.40	154 187	170.5	105 155	130	4.14	4.27	5.75	5.86	42.35
5	77.05 ±3.02	6.28 ±0.91	118 124	121	111 119	115	5.42	5.34	5.17	4.92	38.36
6.1	85.54 ±7.19	7.93 ±0.72	-	-	-	-	6.01	6.21	3.77	3.79	43.00
6.2	85.54 ±7.19	7.93 ±0.72	-	-	-	-	6.01	6.21	3.77	3.79	43.00
7.1	61.51 ±22.76	8.63 ±1.76	33 28	30.5	40 35	37.5	1.67	1.73	5.14	5.08	28.80
7.2	61.51 ±22.76	8.63 ±1.76	30 28	29	36 31	33.5	1.67	1.73	5.14	5.08	26.80
8.1	58.31 ±3.12	7.03 ±1.36	23 22	22.5	29 23	26	1.95	2.02	4.04	3.65	22.55
8.2	58.31 ±3.12	7.03 ±1.36	24 26	25	26 30	28	1.95	2.02	4.04	3.65	24.70
8.3	58.31 ±3.12	7.03 ±1.36	23 25	24	34 31	32.5	1.95	2.02	4.04	3.65	25.10
9.1	56.37 ±3.20	6.05 ±1.05	24 31	27.5	25 33	29	1.95	2.06	5.15	4.74	26.15
9.2	56.37 ±3.20	6.05 ±1.05	23 24	23.5	27 26	26.5	1.95	2.06	5.15	4.74	23.25
10	120.41 ±3.59	8.71 ±1.40	157 212	184.5	145 202	168.5	4.82	4.99	7.56	6.88	44.30
11.1	110.20 ±4.19	8.48 ±0.96	148	175.5	132	164	3.67	3.82	6.23	6.54	41.65
11.2	110.20 ±4.19	8.48 ±0.96	133	163	123	148.5	3.67	3.82	6.23	6.54	39.15
12.1	87.24 ±6.19	8.38 ±1.01	124 180	152	115 (62)	138.5	4.60	4.76	5.81	5.69	35.45
12.2	87.24 ±6.19	8.38 ±1.01	-	●	-	-	4.60	4.76	5.81	5.69	33.80
13.1	59.82 ±5.28	5.87 ±0.61	180 220	200	151 165	158	2.3S	2.47	2.80	2.63	31.90
13.2	59.82 ±5.28	5.87 ±0.61	226 180	203	178 152	165	2.38	2.47	2.80	2.63	32.80
13.3	59.82 ±5.28	5.87 ±0.61	215 175	195	179 144	161.5	2.38	2.47	2.80	2.63	30.20

a.: Tek eksenli hasını- dayanımı,»: Dolaylı çekme dayanımı.CSI: Cerchar sertlik indeksi, Is:Nokia yükü dayanımı indeksi, SH: Shore senlik indeksi

Bu iki büyüklüğün karşılaştırılmasında, dolomit örneklerin dikkate alınmadığında Şekil 7'de görüldüğü gibi ilişkiler elde edilmiştir.

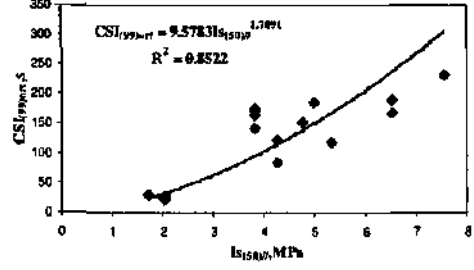


Şekil 7. Ortalama CSI değerleri ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (dolomit örnekleri hariç).

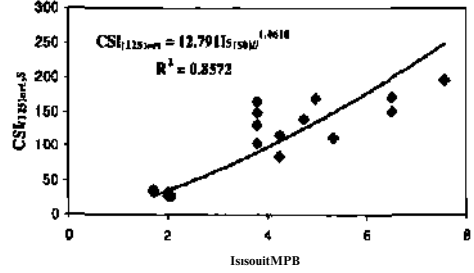
Literatürde, Cerchar sertlik indeks deneyinin lokal bir deney olmasından dolayı kayacın dayanımıyla ilişki kurulmasının doğru olmayacağı ifade edilmektedir. Ancak bu çalışmada, hazırlanan örneklerin önce Shore sertlikleri ölçülmüş böylece kayacın sertliklerini ifade eden iki büyüklük arasındaki ilişkiye bakılmıştır. Daha sonra örneklerin alt ve üst yüzeylerine 2 şer adet delik delinerek ortalama sertlik değeri belirlenmiştir. Böylece lokal uygulamanın getireceği olumsuzluklar elimine edilmeye çalışılmıştır.

#### 5.4 Nokta yükü dayanımı ile Cerchar sertlik indeksleri arasındaki ilişki

Çapsal ve eksenel nokta yükü dayanım indeks deneyleri ite tepe açısı 99° ve 125° olan matkap uçlar için Cerchar sertlik indeks değerleri arasında ilişkiler kurulmaya çalışılmıştır. Ancak eksenel nokta yükü dayanım değerleriyle Cerchar sertlik indeks değerleri arasında anlamlı ilişkiler bulunamamıştır. Düzeltilmiş çapsal nokta yükü dayanım indeks (fishily) değerleri ile Cerchar sertlik indeks değerleri arasında Şekil 8 ve 9'daki gibi üssel ilişkiler elde edilmiştir. Bu büyüklükler arasında kurulan ilişkilerde dolomit kayacı dikkate alınmamıştır.



Şekil 8. Düzeltilmiş çapsal nokta yükü dayanım indeksi ile CSI (99°) ilişkisi.



Şekil 9. Düzeltilmiş çapsal nokta yükü dayanım İndeksi ile CSI(125°) ilişkisi.

## 6 SONUÇLAR

Bu çalışma, Cerchar sertlik indeks deney aleti kullanılarak Zonguldak Havzası'ndaki kayaçların sertliklerinin bulunması amacıyla yapılmış ikinci araştırmadır. Araştırmada, sınırlı sayıda kayaç üzerinde çalışılmıştır. Bu tarzdeki çalışmalara yoğunluk verilmesiyle Havza'da yapılacak mekanize kazılarda (yol, tünel, galeri, cevher kazısı vb.) kullanılacak makinaların performans tahminleri ile keski tüketimleri daha net olarak belirlenmiş olacaktır. Böylece, yapılacak mühendislik projelerinde maliyet riskleri de azalmış olacaktır.

## TEŞEKKÜR

Bu bildiri, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenen "Kömür Çevre Kayaçlarının Cerchar Sertlik İndeksi ve Dayanım Özelliklerinin Belirlenmesi" başlıklı Araştırma Projesi (Proje Kod No: 2001-45-03-05) kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar bu bildirinin hazırlanmasında her türlü imkanı sağlayan Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkürlerini sunarlar.

#### KAYNAKLAR

- Atkinson, R.H., 1993; Hardness tests for rock characterization, *Comprehensive Rock Engineering*, (edt. J.A. Hudson), Vol:3. Chapter 5. pp 105-117.
- Bilgin, N., 1989; *İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 192 s.
- Bilgin, N., Phillips, H.R. ve Yavuz, N. 1989; Kömür Damarlarının Kazılabilirlik yönünden Sınırlandırılması ve ELİ Darkalc Ocağında Saban lı Ayak Uygulaması Örneği, *Türkiye 8. Kömür Kongresi*, TMMOB Maden Müh. Odası Yayını, Zonguldak, s. 31-53.
- Ceiman, T., 1988; Investigation into the Application of Cer char Hardness and Abrasivity Tests in Different Rock Formations of Ankara Coalfield and Eyüp Tunnel, Yüksek Mühendislik Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü., Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul. 92 p.
- Çopur, H. ve Eskikaya, Ş., 1992; ELİ Eynes Bölgesi M2 Marmının Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Mekanize Kazı Bakımından İncelenmesi, *Türkiye 5. Kömür Kongresi*, TMMOB Maden Müh. Odası Yayını, Zonguldak, s. 15-31.
- Holman. J.P. and Gajda, W.Jr. 1984; *Experimental Methods for Engineers*, Fourth Edition. McGraw-Hill Book Company, London, pp.47-99.
- ISRM, 1977; Suggested method for determining hardness and abrasiveness of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Abstr.* , Vol. 15, pp. 89-97,
- ISRM, 1980; Basic geotechnical desaiption of rock masses, *Int. Rock Mech. Min. Sei. and Geomech. Abstr.*. Vol: 18, pp. 85-110.
- ISRM, 1978; Suggested method for determining tensile strength of rock materials. *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Abstr.* , Vol. 15, pp. 99-103.
- ISRM, 1979; Suggested method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Abstr.* , Vol. 16, pp. 135-140.
- ISRM, 1985; Suggested Method for Determining Point Load Strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Abstr.* , Vol. 22, No. 2, pp. 51-60.
- Sofretu, F.M. and Achwenzfeier, G., 2005; AFTES Working Group No 4 Mechanized Excavation, [www.al'tes.asso.l'r](http://www.al'tes.asso.l'r)
- Szwedzicki, T., 1998; Indentation Hardness Testing of Rock, Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sei.*, Vol. 35, No. 6, pp. 825-829.
- Tamrock, 1999; *Rock Excavation Handbook for Civil Engineering*, 99-808-GB-6000. Sandvik Tamrock Corp.. 364 p.
- Valantin, A., 1974; Examen des different procédés classiques de la nocivité des roches vis-a-vis de l'abbataga mécanique. *Industrie Minerale. Mine*, November, pp. 133-140.
- Yaralı, O. 2000; TTK'da Galeri İlerlemelerinde Kullanılan Klasik ve Mekanize Sistemlerin Karşılaştın I ması, *Türkiye 12. Kömür Kongresi*, TMMOB Maden Müh. Odası Yayını, Kdz. Ereğli-Zonguldak.s. 137-147





## Farklı simektit içeriğine sahip yapay örneklerin eksenel şişme gerilmeleri ve eksenel serbest şişme birim deformasyonları

M. E. Bilir & Y. V. Müftüoğlu

*Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye*

**ÖZET:** Şişme gerilmesi ve şişme birim deformasyonu, tek ve üç eksenli şişme deneyleri sonucunda şişme davranışını nicel olarak tanımlayan verilerdir. Şişme olgusu yeterince bilinmediğinden, bu iki temel verinin belirlenmesine çoğu zaman ihtiyaç duyulmaz. Ancak, şişen mineraller su ile temas etmeye başlayınca tasarım aşamasında gerekli önlemler alınmadığından maliyeti yüksek problemlerle bir süreç başlamaktadır. Bu çalışmada, yüksek şişme özelliği olan simektit türü kil minerali üzerinde deneyler yapılmış ve su içeriğindeki % 10 - 12'lik bir artışın maksimum eksenel şişme gerilmesine ulaşmak için yeterli olduğu görülmüştür. Bu nedenle, herhangi bir mühendislik yapısı oluşturulurken yapılacak jeoteknik etüdler arasında şişme olgusunun da araştırılması kesinlikle bulunmalıdır.

**ABSTRACT:** Swelling stress and swelling strain derived from uniaxial and triaxial swelling tests are the data to define swelling behavior quantitatively. Since the swelling phenomena is not known well, determination of these two basic data is not usually required. Yet, when swelling minerals are exposed to water, a costly phase begins since the necessary measures are not taken at the design stage. In this work, tests are carried out on simectite type clay mineral which has a high potential for swelling, and it was observed that in order to reach maximum axial swelling stress, a 10 - 12 % of increase in the water content is sufficient. Therefore the geotechnical studies to be carried out during the execution of any type of engineering structures must definitely include investigation of swelling phenomena.

### I GİRİŞ

Şişen zemin ve kayalar, tüm dünyada problemler olarak görülmesine rağmen şişme davranışının tanınmaması nedeniyle şişme verilerinin saptandığı deneylere yeterli önem verilmemiştir. Bunun en önemli sonucu tek eksenli deney alet ve yöntemleri ile ilgili standartların öneri şeklinde olması, üç eksenli alet ve yöntemleri ile ilgili henüz bir standart geliştirilememiş olmasıdır. Özellikle şişme gerilmesi - şişme birim deformasyonu davranışının belirlenmesi için gerekli sürenin uzun olması da veri elde etmeyi zorlaştıran bir etkidir.

Şişen zemin ve kayaların su içeriğinde yeterli miktarda artış olduğunda şişme birim deformasyonları oluşmaktadır. Şişme birim de formasyonlarının oluşması engellenirse şişme gerilmeleri meydana gelmektedir.

Şişme birim deformasyonu ve şişme gerilmesinin büyüklüğü; şişen minerallerin yüzdesi ve tipi, su

içeriği ve yanal basınca bağlı olarak değişmektedir. Yanal basıncın etkisini belirleyebilmek için deneylerin üç eksenli olarak yapılması gerekir.

Bu çalışmanın amacı, şişme gerilmesi ve şişme birim deformasyonları ile şişen malzeme yüzdesi ve su içeriği arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılmasıdır.

### 2 DÜZENEKLER

Şişme olgusu ile ilgilenen araştırmacılar amaçlarına göre farklı tasarımlarda şişme deney düzenekleri geliştirmişlerdir (Bilir & Müftüoğlu, 2002). Bu düzeneklerden bazıları lek bir veriyi belirleyebilen bazıları da her iki veriyi de ölçebilecek şekilde tasarlanmıştır. Yine bazıları da mekanik ölçerler bulunurken bazıları da elektronik ölçerler, veri toplama kartı ve bilgisayar gibi elektronik donanımlar kullanılmıştır. Yerdeğiştirme kontrolünün yapıldığı düzenekler her iki verinin

belirlenmesine olanak sağlamakta ve elektronik donanımlar kullanılması halinde de deneylerin amacına uygun olarak yürütülmesi ve sık aralıklarla veri alınması gibi üstünlükleri nedeniyle şişme deneylerini oldukça kolaylaştırmaktadır.

Mekanik ölçerlerin kullanıldığı bu deneylerde şişme gerilmesinin ölçülmesinde odometre, şişme yerdeğiştirmelerinin ölçülmesinde ise şişme birim deformasyon ölçer düzeneği kullanılmıştır.

Odometre aleti; yük halkası, komparatör, yük uygulama kolu ve redüktör, yüklem kolu ve şişme hücresinden oluşmaktadır (Şek. 1).

2 kN kapasitesi olan yük halkası, 0.002 mm hassasiyette bir komparatöre sahiptir. Ölçülen hareket miktarı kalibrasyon eğrisi ile yüke çevrilmektedir.

Şişme hareketinin ölçüldüğü komparatör, 0.002 mm hassasiyette olup 30 mm hareket mesafesine sahiptir.

Yük uygulama kolu ve redüktör ömeğe yük uygulamak için kullanılır. Örnek üzerine yük uygulamak için yük uygulama kolu saat ibresinin tersi yönünde, yükü kaldırmak için saat ibresi yönünde çevrilir.

9.82 : 1 oranlı yüklem kolunun bir ucunda yük halkası diğer ucunda örnek bulunur. Yük halkasından uygulanan yük ömeğe 9.82 oranında etkir.

Şişme hücresi ise; su kabı, 50 mm çaplı çelik halka, alt poroz taş, üzerinde üst poroz taş bulunan yüklem başlığı ile yanaJ başlıktan meydana gelmiştir (Şek. 2). Su kabının tabanına alt poroz taş

ve üzerine süzgeç kağıdı konulur. Bunun üzerine içinde örnek bulunan çelik halka yerleştirilir. Örneğin üzerine tekrar süzgeç kağıdı konulduktan sonra önce yanal başlık sonra da örnek üzerine gelecek şekilde yüklem başlığı yerleştirilerek şişme ölçer hücresi deneye hazır hale getirilir.

Şişme birim deformasyon ölçer düzeneği ise komparatör, bronz halka, poroz taşlar, yüklem başlığı, kenetleme çubuğu ve somunu ile su kabından oluşmaktadır (Şek. 3).

Eksenel şişme yerdeğiştirmelerinin ölçümünde kullanılan komparatör 0.01 mm hassasiyette ve 50 mm kapasitedir.

Örneğin içine konulduğu bronz halka 54 mm çapındadır. Radyal yöndeki şişme kısıtlandığından halka içindeki Örnek eksenel yönde şişmeye çalışır.

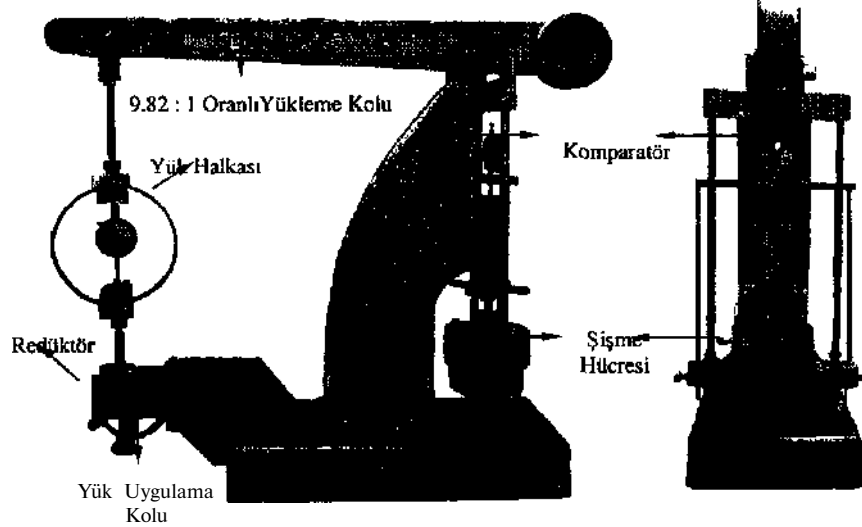
Ömeğe su girişini sağlayan poroz taşlardan biri örneğin altında diğeri örneğin üstüne yerleştirilen yüklem başlığının içindedir.

Çelik halkanın sabit kalmasını sağlamak amacıyla kenetleme çubuğu ve somunu kullanılır.

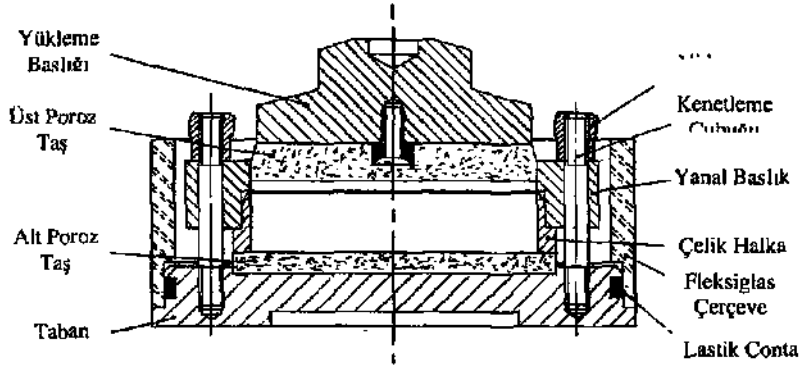
Su kabının kenarları fleksiglasdan, tabanı alüminyumdan yapılmıştır. Kenetleme çubukları tabana tutturulur.

### 3 ÖRNEK HAZIRLAMA

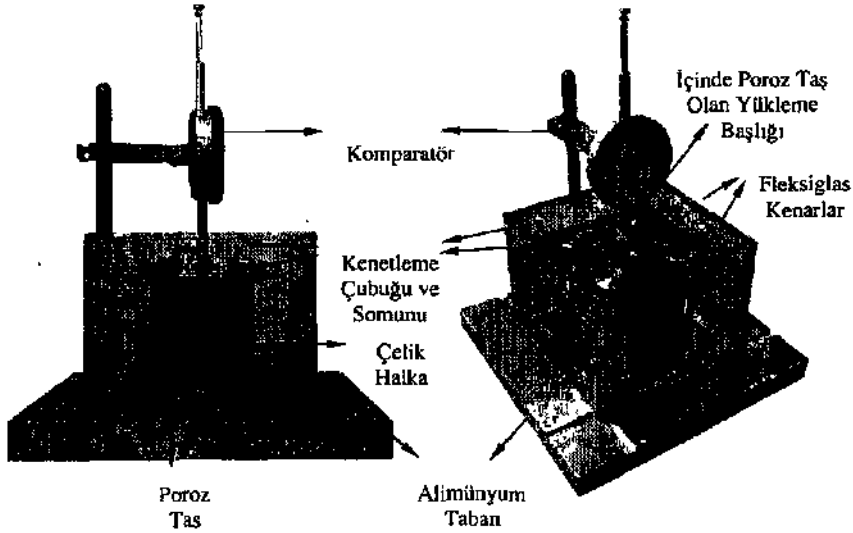
Yapay örneklerle deneylerin gerçekleştirilmesinin en büyük üstünlüğü örnek içindeki simetit miktarının kontrol edilerek farklı şişen malzeme oranlarında örnekler hazırlanabilmesidir.



Şekil I. Odometre.



Şekil 2. Şişme hücresi.



Şekil 3. Şişme birim deformasyon ölçer.

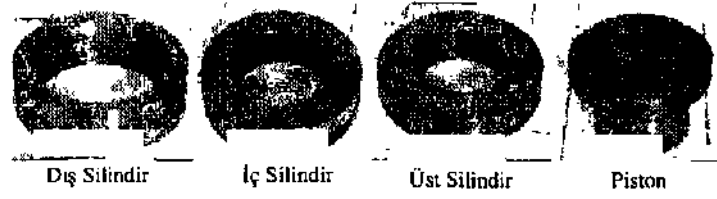
Yapay örnekler, bentonit ile ince taneli kum (0.149 mikron elek altı - 0.074 mikron elek üstü) karışımından oluşmaktadır.

Bentonitin mineralojik bileşimini ortaya çıkarmak için yapılan X-ışın kırınım (XRD) çözümü sonucunda tüm numunede % 94 kil, % 1 kuvars, % 4 feldspat ve % 1 kalsit olduğu belirlenmiştir.

Kil mineralinin tipini belirlemek için yapılan detay kil (normal, etilen glikollü ve fırınlanmış) analizinde % 100 simseküt grubu kil mineralinin olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla bentonitin içindeki % 6'lık kısmın şişmeye bir katkısının olmadığı belirlenmiştir.

Toz karışımından bir karot örneği oluşturabilmek için karışımın sıkıştırılması gerekmektedir. Bunun için. Yeşil (1991) tarafından geliştirilen özel bir aparat kullanılmıştır. Çelikten yapılmış olan örnek hazırlama aparatı; dört parçadan oluşan iç silindir, iç silindiri tutan dış silindir, piston kılavuzluk eden üst silindir ve bir piston oluşur (Şek. 4).

Yapay silindirik bir örnek hazırlayabilmek için iç silindirin parçaları, dış silindir içine yerleştirilir. Üst silindir ise iç silindirin üzerine gelecek şekilde konulur. Karışım, silindirlerin ortasında oluşan boşluğa dökülür ve malzemenin üzerine yerleştirilen piston hidrolik pres vasıtasıyla yük uygulanarak 102 halindeki karışım sıkıştırılır.



Şekil 4. Örnek hazırlama aparatının parçaları (Yeşil, 1991).

Pistonun üzerindeki çizgi üst silindire temas ettiğinde sıkıştırma işlemi tamamlanır. Örneği aparatından çıkarmak için sırasıyla piston, üst silindir ve dış silindir sökülür. En sona, içinde preslenmiş örnek bulunan iç silindir kalır. Parçalar birbirinden kolayca ayrıldığında örnek ortaya çıkar.

ISRM (1979)'a göre çap, kalınlığın 2.5 katından az olmamalıdır. ISRM (1989) ise çapın 5ü - 100 mm arasında, kalınlığın da 20 - 30 mm arasında daha uygun olduğunu önermektedir. Buna göre tüm örnekler 20 mm yükseklikte ve 2 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta hazırlanmıştır. Odomelrc deneylerindeki örneklerin çapı 50 mm ve çap/yükseklik oranı 2.5, aksenal serbest şişme birim deformasyonu deneylerinde kullanılan örneklerin çapı 54 mm ve çap/yükseklik oranı 2.7'dir. Tüm örneklerin yukarıda verilen yoğunluk ve çap/yükseklik oranına sahip olacak şekilde sıkıştırılması tasarlanmasına rağmen pratikte bu oldukça zordur. Dolayısıyla bu değerlere mümkün olduğunca yaklaşılmaya çalışılmıştır.

Her iki deneyde de kullanılan örneklerde benlonit ağırlıkça % 10, % 20, % 30 ve % 40 oranındadır. Dolayısıyla şişme özelliği olan simektit grubu kil minerallerinin oranı ağırlıkça % 9.4, % 18.8, % 28.2 ve % 37.6'dır.

#### 4 DENEY YÖNTEMİ

Eksenal şişme gerilmesinin belirlenmesi amacıyla sabit hacim deney yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin esası, su ile temas eden ve radyal olarak kısıtlanmış örneğin şişmesine engel olarak yani sabit bir hacimde tutarak maksimum aksenal şişme gerilmesine ulaştırılmasıdır (ISRM, 1989).

Eksenal şişme gerilmesinin belirlenmesinde aşağıdaki işlemler dizisi uygulanır;

- Yukarıdaki anlatıldığı gibi hazırlanan şişme ölçer hücresi odometreye yerleştirilir.
- Yük halkası ve komparatör sıfırlanır ve örneğin üzerine ön yük uygulanır. Gösterge lerdck i değerler kaydedilir.
- Hücreye sal' su konularak deneye başlanır.

- Şişme yerdeğiştirmesi 0 ile 10 mikron arasında kontra] edilmeye çalışılır. Diğer bir deyişle örnek üzerindeki aksenal yöndeki yerdeğiştirmesinin 10 mikrona kadar çıkmasına izin verilir, Yerdeğiştirmesinin 10 mikronu aştığı durumlarda örnek üzerindeki yük yüklemeye kolu vasıtası ile artırılır ve şişme yerdeğiştirmesinin 10 mikronun altına düşmesi sağlanır. Bu işlem şişme yerdeğiştirmesinin 10 mikronun altında sabit bir değerde kalmama kadar yani şişme duruncaya kadar devam eder.

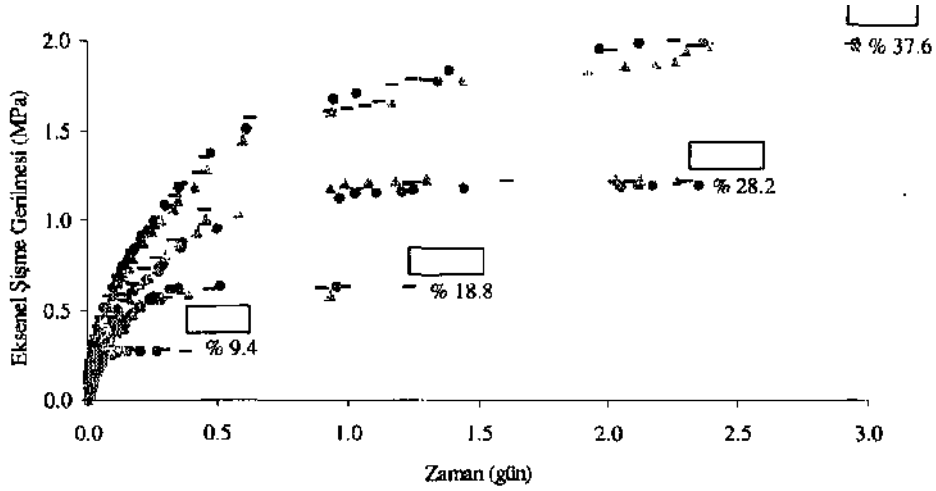
- Başlangıçta çok sık olmak üzere belirli zaman aralıklarında şişme miktarı, şişme yükü ve zaman kaydedilir.

- Elde edilen maksimum şişme yükü kesit alanına bölünerek maksimum şişme gerilmesi belirlenir.
- Deney sonunda örneğin su içeriği belirlenir.

% 9.4, % 18.8, % 28.2 ve % 37.6 simektit grubu kil minerali içeren, 50 mm çaplı, çap/yükseklik oranı 2.5 olan 2 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yapay örneklerin aksenal şişme gerilmesi ve zaman İlişkisi Şekil 5'de gösterilmektedir.

Eksenal serbest şişme birim deformasyonu deneyinin amacı, radyal yönde kısıtlanmış olan örneğin su ile temasa geçmesiyle düşey yöndeki serbest şişme birim deformasyonunun ölçülmesidir. Örnekteki radyal birim deformasyonlar ölçülememiştir. Çünkü, yapay örneğin su ile doğrudan teması örneğin hızlı bir şekilde dağılmasına neden olmuştur. Deneyin yapılmasında aşağıdaki işlemler dizisi uygulanır;

- Su kabının tabanına üzerinde filtre kağıdı olan poroz taş yerleştirilir.
- Örnek çelik halka içine yerleştirilerek filtre kağıdının üzerine oturtulur. Filtre kağıdının kullanılmasının amacı, kil tanelerinin poroz taşın gözeneklerini kapatmasını engellemektir.
- Örneğin üzerine de sırasıyla filtre kağıdı ve içinde poroz taş bulunan başlık konulur.
- 4 adet kenetleme çubuğu su kabının tabanına monte edilir. Kenetleme çubuklarına geçen somunlar vasıtasıyla çelik halka sıkıştırılarak sabitlenir. Aksi takdirde örnek çelik halkayı kaldırarak hatalı sonuçların ölçülmesine neden olmaktadır.



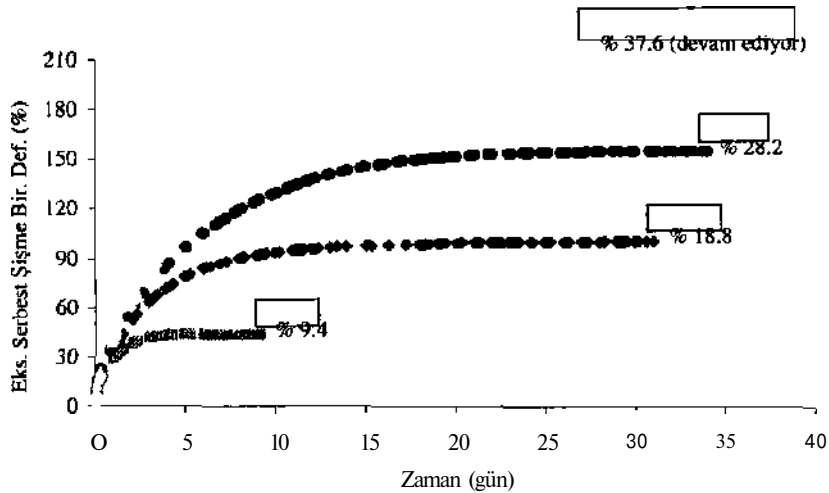
Şekil 5. Simektit içeriğine bağlı olarak eksenel şişme gerilmesinin zamanla değişimi.

Komparatör, örneğin üzerine gelecek şekilde sabitlenir ve sıfırlanır.

Deney kabı numunenin yüzeyi tamamen kapanıncaya kadar saf su ile doldurulur ve eksenel serbest şişme yerdeğıştirmeleri zamanın fonksiyonu olarak maksimuma ulaşınca veya sabit bir seviyeye kadar kaydedilir.

Ölçülen yerdeğıştirmeler, örneğin ilk kalınlığına bölünerek eksenel serbest şişme birim deformasyonları bulunur.

% 9.4, % 18.8, % 28.2 ve % 37.6 simektit grubu kil minerali İçeren, 54 mm çaplı, çap/yükseklik oranı 2.7 olan 2 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki yapay örneklerin eksenel serbest şişme birim deformasyonu ve zaman ilişkisi Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Simektit içeriğine bağlı olarak eksenel serbest şişme birim deformatiyonunun zamanla değişimi.

Ayrıca örneklerin su içeriği, likit limit ve plastik indeks ve fiziksel özellikleri Çizelge 1'de limit gibi indeks özellikleri de belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen şişme verilen ile örneklerin verilmektedir.

Çizelge 1 Simektit içeriğine göre şişme deney verilen ile yapay örneklerin indeks ve fiziksel özellikler.

Simektit İçeriği (%)		9 4			18 8			28 2			37 6		
İndeks özellikleri	LL	54 9			100 7			157 4			210 3		
	PL	31 5			32 6			33 3			34 9		
	PI	23 4			68 1			124 1			175 4		
Mak Eksenel Şişme Gerilmesi (MPa)		0 267	0 270	0 274	0 624	0 578	0 624	1 213	1 188	1 216	1 966	1 987	1 976
Su içeriği, w (%)	w <sub>lik</sub>	1 77	1 66	1 73	1 76	1 89	1 89	2 87	3 70	3 50	3 94	3 95	3 88
	w <sub>serb</sub>	13 57	13 52	13 39	13 80	13 42	13 65	13 98	14 09	14 09	14 33	14 13	14 68
	Δw	11 80	11 86	11 66	12 04	11 53	11 76	11 11	10 39	10 59	10 39	10 18	10 80
Yoğunluk, d (gr/cm <sup>3</sup> )		2 00	2 00	1 99	2 00	1 99	1 99	2 00	2 00	2 01	2 01	2 01	2 00
Çap, R (cm)		5 0											
Yükseklik, h (cm)		2 00	2 00	2 00	2 00	2 00	2 01	2 00	2 00	1 99	1 99	1 99	2 00
Çap/Yükseklik, (R/h)		2 50	2 50	2 50	2 50	2 50	2 49	2 50	2 50	2 51	2 51	2 51	2 50
Mak Eks Serbest Şişme Birim Def (%)		44 05			100 24			154 97			200 36		
Su içeriği, w (%)	w <sub>lik</sub>	1 95			2 74			3 76			4 23		
	w <sub>serb</sub>	39 45			69 82			103 17					
	Δw	37 50			67 08			99 41					
Yoğunluk, d (gr/cm <sup>3</sup> )		2 00			2 00			1 99			2 02		
Çap, R (cm)		5 4											
Yükseklik, h (cm)		2 00			2 00			2 01			1 98		
Çap/Yükseklik, (R/h)		2 70			2 70			2 69			2 73		

LL Likit Limit, PL\* PlaMik Limit, PI Plastisite İndisi

## 5 VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Şişme deneylerinde yapay örneklerin kullanılması benzer örneklerin hazırlanmasına olanak vermiş böylece şişme davranışına etki eden belirsizliklerin en aza indirilmesi sağlanmıştır.

Her bir simektit içeriğinde odometre deneyi için 3'er adet, eksenel serbest şişme birim deformasyonu deneyi 1'çm 1'er adet deney gerçekleştirilmiştir. % 37.6 simektit içeriğindeki örneğin eksenel serbest şişme birim deformasyonu henüz tamamlanmamakla birlikte deneyin sonuna yaklaşılmıştır. Eksenel serbest şişme birim deformasyonu deneyi, aynı simektit içerikleri için 2 kez daha tekrarlanacaktır. Buradaki sıkıntı deney düzeneği sayısının 2 olmasından kaynaklanmaktadır. Uzun süren şişme deneylerinde düzenek sayısı en az 3 olmalıdır.

Maksimum eksenel şişme gerilmesi (O<sub>s</sub>) ve simektit içeriği arasında (I) eşitliğiyle verilen ilişki bulunmuştur (Şek. 7)

$$O_s = 0.01 * S_i^{1.437} \quad R^2 = 0.98 \quad (D)$$

Buna göre simektit içeriğindeki artış, maksimum eksenel şişme gerilmesini arttırmaktadır. Simektit içeriği artmasına rağmen, maksimum eksenel şişme gerilmesine ulaşıldığı andaki su içeriği değişiminde net bir artış görülmektedir. Bu değer, ortalama % U.18'dir.

Maksimum eksenel serbest şişme birim deformasyonu (&) ve simektit içeriği arasında aşağıdaki eşitlikle verilen ilişki bulunmuştur (Şek. 8).

$$E_s = 5.64 * S_i - 7.19 \quad R^2 = 0.99 \quad (2)$$

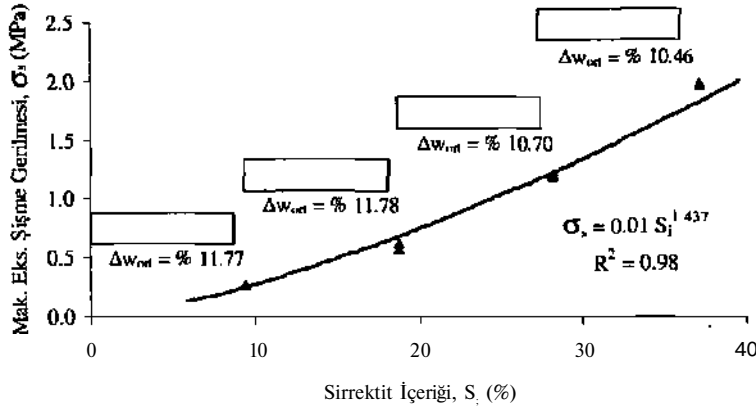
Buna göre simektit içeriği arttıkça, maksimum eksenel serbest şişme birim deformasyonu ve su içeriği değişimi artmaktadır.

% 37.6 simektit içeriğinde, maksimum eksenel şişme gerilmesi ortalama olarak 1.98 MPa, maksimum eksenel serbest şişme birim deformasyonu % 200 bulunmuştur. Graham et.al. (1986), farklı bentonit ve kum karışımına sahip yapay örneklerin eksenel şişme gerilmesinin 0.6 - 3.0 MPa arasında değiştiğini belirtmektedir. Bu değerler önlem alınmadığı takdirde şişen

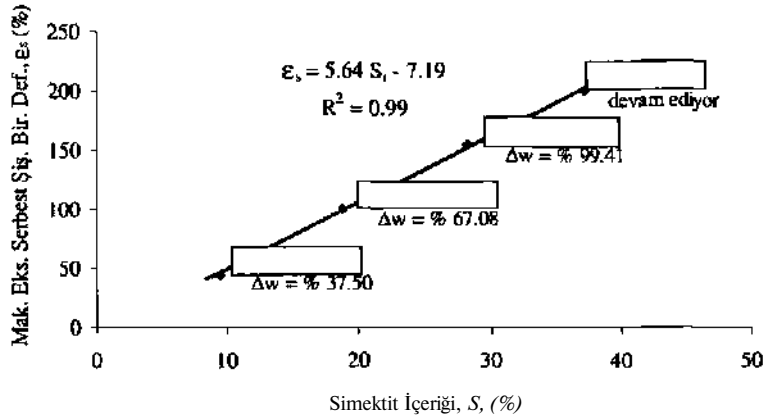
>rtamlarda oluşturulacak mühendislik yapılarında ciddi problemler oluşuracağına bir göstergesidir.

Odometre deneylerinde maksimum aksel şişme gerilmesine ulaşma süresi simektit içeriğine bağlı olarak 0.15 - 2.5 gün arasındadır. Aksel serbest şişme birim deformasyonunun belirlendiği deneylerde maksimum ulaşma süresi ise 3.5 - 35 gün arasında değişmektedir. Simektit içeriğinde % 37.6'dan sonraki

artış bu süreyi daha da arttıracaktır. Şekil 5 ve Şekil 6'da görüldüğü gibi şişme eğrilerindeki veri boşlukları deneylerin aralıksız devam etmesi ve gece saatlerinde veri kaydedilememesi nedeniyle oluşmuştur. Şişme deneylerinde kullanılacak ölçerlerin elektronik olması ve örnek üzerine yükün otomatik olarak uygulanması deneylerin yürütülmesini ve veri kaydını oldukça kolaylaştıracaktır.



Şekil 7. Simektit içeriği ile maksimum aksel şişme gerilmesi arasındaki ilişki.



Şekil 8. Simektit içeriği ile maksimum aksel serbest şişme birim deformasyonu arasındaki ilişki.

## 6 SONUÇLAR

Farklı simektit içeriğinde hazırlanmış yapılar Örneklerin şişme verileri ve su içeriği değişiminin incelendiği bu çalışmada, elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Simektit içeriği arttıkça maksimum aksel şişme gerilmesi ve maksimum aksel şişme birim deformasyonu artmaktadır.
- Odometre deneyindeki tüm örnekler, ortalama % 11.18'lik su içeriği değişimiyle maksimum aksel şişme gerilmesine ulaşmaktadır. Simektit içeriğindeki artış, maksimum aksel serbest

şişme birim deformasyonuna ulaşmak için gerekli su miktarını arttırmaktadır.

- Maksimum eksene! şişme gerilmesi, maksimum aksenal şişme birim deformasyonuna göre daha kısa sürede belirlenebilmektedir.
- Şişen mineraller içeren ortamlarda oluşturulacak mühendislik yapılarının tasarımı için şişme verilerinin mutlaka belirlenmesi gereklidir.
- Şişme gerilmelerinin belirlendiği deneylerde ölçerlerin ve yük uygulama mekanizmasının mekanik olması, deneylerin hassas bir şekilde yürütülmesini ve veri kaydını zorlaştıran bir etkidir.
- Şişme deneylerinin uzun süreli deneyler olması nedeniyle kullanılacak düzenek sayısının fazla olması, araştırmaların daha çabuk sonuçlanmasında çok etkili olacaktır.

## 7 KAYNAKLAR

- Bilir, M. E., Müftüoğlu, Y. V., 2002. Şişme deney düzenekleri, 6. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Konya, s. 155-162
- Graham, J., Gray, M. N., Sun, B.C., Dixon, D. A., 1986, Strength and volume change characteristics of a sand - bentonite buffer. *Proc. 21st Int. Con. On Radioactive Waste Management*, Winnipeg, Man., pp. 188 - 194.
- ISRM, 1979, Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability indeks properties. *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Abstr.*, Vol: 16, No: 2, pp. 141 - 156..
- ISRM, 1989. Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Abstr.*, Vol: 26, No: 5, pp. 415 -426.
- Yeşil, M. M.. 1991, *Determination of Three Dimensional Swelling Characteristics of Clay Bearing Rocks*, A Doctor of Philosophy Thesis in Mining Engineering. METU, Ankara, 109 p.