

## 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 kazılabilen iri iğnin 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).

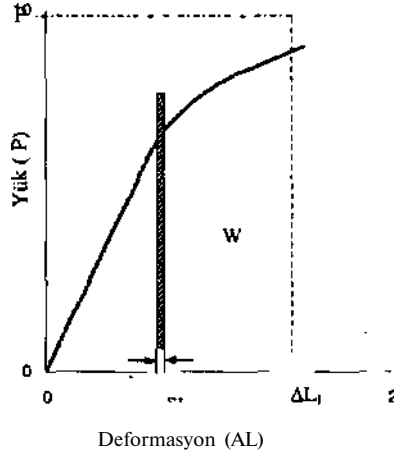
Spesifik enerji ile kayaçların dayanımı (Başarı ve Karpuz 2004) ve birim şekil değiştirme enerjisi arasında (Thuro ve Spaun 1996, Ersoy 2003) anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Ancak, araştırmacıların çoğu, birim deformasyon enerjisini hesaplarken, yalnızca Gerilme - Birim Deformasyon ( $\sigma - \epsilon$ ) 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 İř, 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 grafiđi.

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.

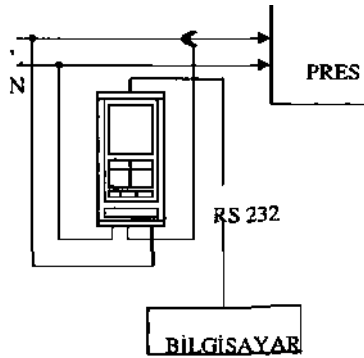
### 3 MALZEME VE YÖNTEM

#### 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)	$\frac{e}{(MJ/m^2)}$	$\frac{w}{Alan}$	$\sigma_c \cdot \epsilon_{m} / 2$	$AI/\sigma_c \cdot \epsilon_{m} / 2$	$\sigma^2 / (2 \cdot E)$	$E \cdot \epsilon^2 / 2$
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:

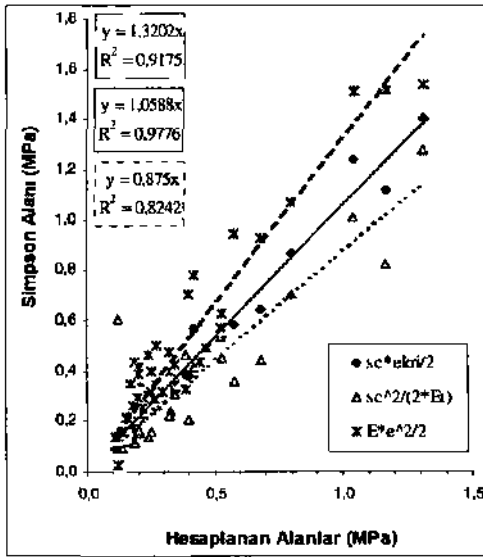
$$e = 0,4907 \cdot G_L; \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.1)$$

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

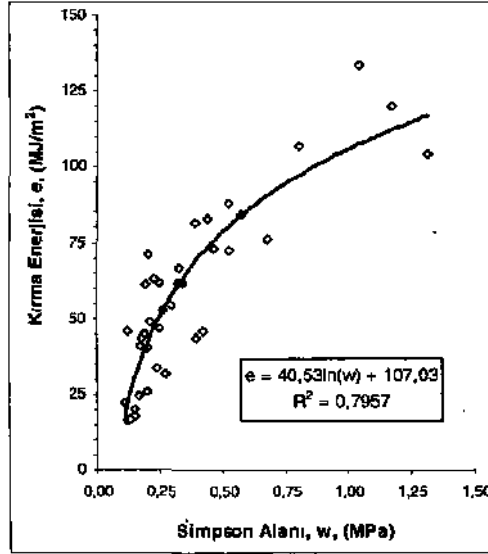
$G_L$  = kayacın tek eksenli basınç dayanımı (MPa).

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.

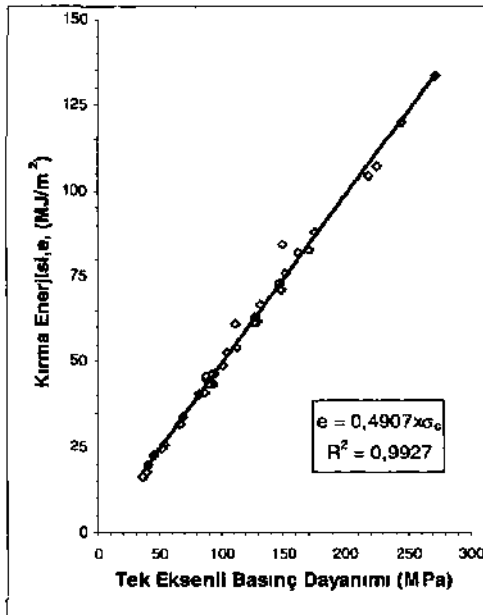
Oysa, Şekil 4'ten de görüldüğü gibi, kırılmalar için kullanılan enerjiler birbirlerinden farklıdır.



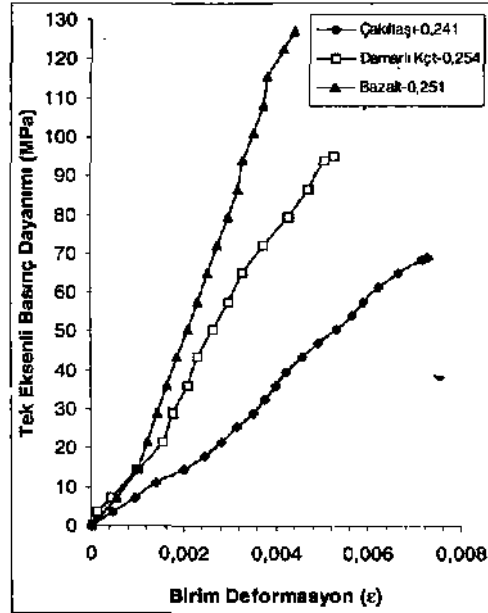
Şekil 3. Simpson alanı ve hesaplanan şekil değiştirme enerjileri arasındaki ilişkiler.



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



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



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.

## TEŐEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmayı maddi olarak destekleyen Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teőekkür 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 mechanability 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.