



## Kayaçların kırılma tokluğu (Mod-I) ile fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerinin değerlendirilmesi

### *Evaluation of the relationships between fracture toughness (Mode-I) and physico-mechanical properties of rocks*

Nazmi ŞENGÜN, Raşit ALTINDAĞ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ISPARTA

Geliş (received) : 22 Mart (March) 2010

Kabul (accepted) : 05 Temmuz (July) 2010

#### ÖZ

Bu çalışmada, onbeş farklı kayacın Tür-I (Mod-I) kırılma tokluk değerleri V-çentikli Brazilian diski (CCNBD) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu kayaçların kırılma tokluk değerlerinin yanı sıra, diğer fiziksel ve mekanik özellikleri de ilgili standartlar ve önerilen yöntemler çerçevesinde tayin edilmiştir. Kayaçların kırılma toklukları ile fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler araştırılmış ve en yüksek korelasyon katsayısı  $r = 0.84$  ile Brazilian çekme dayanımı – kırılma tokluğu arasında bulunmuştur. Buna göre, Brazilian çekme dayanımı kullanılarak kayaçların kırılma tokluğunun daha pratik, hızlı, ekonomik ve gerçeğe en yakın bir şekilde tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Fiziko-mekanik özellikler, kırılma tokluğu, V-çentikli Brazilian diski.

#### ABSTRACT

*In this study, Mode-I fracture toughness of fifteen different rocks were determined by using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD). In addition, physico-mechanical properties of these rocks were also determined according to the standards and suggested methods. Relationships between fracture toughness and physico-mechanical properties of the tested rocks were investigated and the best correlation was found between Brazilian tensile strength and fracture toughness with a coefficient of correlation of 0.84. Based on the results, Brazilian tensile strength could be used to predict the fracture toughness of rock rather practically, speedily, economically and reliably.*

**Key words:** Physico-mechanical properties, fracture toughness, cracked chevron notched Brazilian disc.

#### GİRİŞ

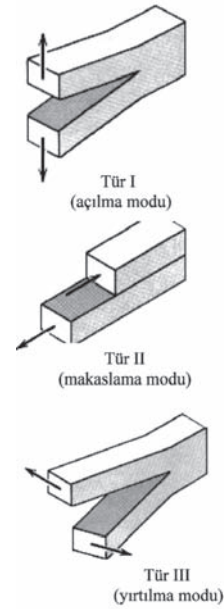
Kırılma tokluğu, kırılma mekanizmasında çatlak oluşumu ve gelişimi gibi kırılma direncine karşı kayanın direncini gösteren başlıca özelliklerden biridir. Bir malzemenin kırılma tokluğu, onun çatlak gelişimine karşı direncini veya yeni yüzey alanları oluşturmak için gerekli kırılma enerjisi

tüketim hızını ifade etmektedir. Bu özellik, kaya mühendisliğinde özellikle kayaçların parçalanma ve çatlatma uygulamalarında önemli ve yararlı bir parametre olarak gösterilmektedir (Whittaker vd., 1992). Kırılma tokluğu kavramı ilk kez 1960'lı yıllarda ortaya atılmış olup, kavramın kuram ve uygulamaları halen gelişme aşamasındadır.

Griffith (1921), kırılmayla ilgili ilk başarılı analizleri gevrek malzemeler için gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, bir çatlakın büyümesinin ancak bu sırada serbest kalan elastik enerjinin yeni yüzey yaratmak için gerekli yüzey enerjisine eşit veya daha fazla olması halinde gerçekleşebileceğini ifade etmiştir. Irwin (1957), enerji yaklaşımı, gerilme yoğunluğu yaklaşımıyla eşdeğer tutarak kırılma mekaniğine yeni bir açılım getirmiştir. Buna göre, çatlak ucunda kritik bir gerilme dağılımına erişildiğinde kırılma başlamaktadır. Bünyesinde çatlak bulunan ve gerilmeye maruz kalan malzemede, çatlak ucunda gerilme yoğunlaşması olmaktadır. Bu gerilme yoğunlaşması artan gerilmeler karşısında artmakta olup, bu aşamada çatlak duraylıdır. Gerilme yoğunluğu kritik bir dengeye ulaşıncaya çatlak duraysız duruma geçerek ilerlemeye başlar. Çatlak ucundaki gerilme yoğunluğu, gerilme şiddet faktörü ( $K$ ) olarak adlandırılır ve bunun kritik değeri ise kırılma tokluğu ( $K_c$ ) olarak tanımlanır. Gerilme şiddet faktörü çatlak ucundaki gerilmenin şiddetinin miktarıdır ve bir malzeme özelliğidir (Köksal, 1991). Gerilme şiddet faktörü, gerilme uygulanan malzemenin geometrisine ve uygulanan yüke bağlı olarak değişmektedir.

Cisimlerde çatlak ilerleme davranışı üç farklı zorlama şekliyle görülmektedir (Şekil 1). Bunlardan kayaçlar için en önemlisi ve kırılma açısından en tehlikelisi açılma Tür-I (Mod-I)'dir. Çatlakın ilerlemesi bu modların bir veya birkaçının aynı anda etkisiyle gerçekleşmektedir. Mod-I kırılma tokluğunu belirleyen başlıca deney yöntemlerinden bazıları Çizelge 1'de verilmiştir. Kayaçlarda Mod-I kırılma tokluğunu belirlemek amacıyla Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği (ISRM) tarafından Chevron Notched Short Rod (SR), Chevron Edge Notched Round Bar in Bending (CB) ve V-Çentikli Brazilian Diski (Cracked Chevron-Notched Brazilian Disc, CCNBD) deneyleri önerilmiş yöntemler olarak kabul etmiştir (ISRM, 1988, 1995, 2007).

Kırılma tokluğu, kaya mekaniği çalışmalarında sınıflandırma parametresi, indeks değer ve malzeme özelliği olarak kullanılmaktadır (ISRM, 1988; Köksal, 1991). Gunsallus ve Kulhawy (1984) kırılma tokluğu sonuçlarına göre kayaçları sınıflandırmışlardır. Kayaçların kırılma tokluğu değerleri, kayaçların patlatma, parçalanma ve hidrolik



Şekil 1. Çatlak ilerleme türleri (Whittaker vd., 1992).  
Figure 1. Modes of crack propagation (Whittaker et al., 1992).

çatlama modellenmesinde de kullanılmıştır (Bi- eniawski, 1967; Ouchterlony, 1974; Boone vd., 1986; Reogiers vd., 1982). Nelson ve Fong (1986), kırılma tokluğunu kullanarak kazı makinesinin kesici kuvvetleri ve ilerleme kuvvetleri arasındaki ilişkilerin tahmin edilmesinin mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Bearman (1991), kayaçların ufalanma davranışlarını tahmin etmek için dayanım sınıflaması olarak kırılma tokluğunu kullanmıştır. Donovan ve Karfakis (2004), diğer malzeme özelliklerine oranla kırılma tokluğunun özgül öğütme enerjisi ile daha güçlü ilişkiler verdiğini ifade etmiştir. Kim (2006), özgül patlama enerjisi, parçalanma oranı ve kırılma tokluğu arasında görgül bir model geliştirmiştir.

Whittaker vd. (1992), literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından yayımlanmış çalışmalarda kayaçların kırılma toklukları ile diğer mühendislik özellikleri arasındaki ilişkileri özetlemişlerdir. Brown ve Reddish (1997), kırılma tokluğu ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi incelemişler ve  $r = 0.95$  korelasyon katsayısına sahip bir eşitlik önermişlerdir. Bearman (1999), oniki kayaç kullanarak kırılma tokluğunu nokta yükü dayanım indeksinden belirlemek için ampirik bir eşitlik önermiştir. Altındağ (2000), yedi farklı kaya türü üzerinde tek kama çatlak (Single Edge Crack Brazilian Disc,

Çizelge 1. Mod-I kırılma tokluğu deney yöntemleri (Whittaker vd., 1992'den).

Table 1. Different fracture toughness (mode-I) test methods (after Whittaker et al., 1992).

Deney yöntemi	Kaynak
Chevron Notched Short Rod (SR)	Barker (1977)
Chevron Edge Notched Round Bar in Bending (CB)	Ouchterlony (1980)
Cracked Chevron-Notched Brazilian Disc (CCNBD)	Shetty vd. (1985)
Single Edge Crack Brazilian Disc (SECBBD)	Szendi ve Howarth (1982)
Modified Ring Test (MRT)	Thiercelin ve Roegiers (1986)
Flattened Brazilian Disc (FBD)	Guo vd. (1993)
Single Edge Notch Beam (SENB)	Srawley ve Gross (1976)
Edge Nothc Disc (END)	Danovan (2003)
Single Edge Cracked Half Disc	Chong ve Kurupku (1984)

SECBBD) deney yöntemini kullanarak kayaçların kırılma tokluğunu belirlemiş ve diğer kayaç özellikleri ile bu özellik arasındaki ilişkileri incelemiştir. İnceleme sonucunda kayacın kırılma tokluğu ile diğer mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri istatistiksel anlamlılık açısından sırasıyla; tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, koni delici değeri ve nokta yükü dayanım indeksi değerleri ile ifade etmiştir. Zhang (2002), kırılma tokluğu ile çekme dayanımı arasında  $r = 0.97$  korelasyon katsayısına sahip doğrusal ve pozitif bir ilişki bulmuştur.

Kayacın karmaşık yapısından dolayı kırılma tokluğunu belirlemenin, kayaçların bazı fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesinden daha güç olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, ISRM (2007) tarafından da önerilen V-Çentikli Brazilian Diski (Cracked Chevron-Notched Brazilian Disc, CCNBD) yöntemi kullanılarak kayaçların (Çizelge 2) Mod-I kırılma tokluğu değerleri belirlenmiş ve kayaçların diğer fiziko-mekanik özellikleri kullanılarak kırılma tokluğu değerlerinin tahmin edilmesi için görgül eşitlikler önerilmiştir.

## V-ÇENTİKLİ BRAZİLİAN DİSKİ KIRILMA TOKLUĞU DENEYİ

V-çentikli Brazilian disk (Cracked Chevron-Notched Brazilian Disc, CCNBD) (Şekil 2) kırılma tokluğu deney yöntemi ilk kez Shetty vd. (1985) tarafından seramik malzemelerinin kırılma tokluğunu belirlemek için önerilmiştir. Kayaçlarda ise bu yöntem, ilk kez Fowell ve Chen (1990) tarafından Mod-I kırılma tokluk değerlerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu deney yönteminin karot örnekler üzerinde

yapılması, deney örneğinin kolay hazırlanması, daha yüksek kırılma yükü değerinin olması, farklı yüklemeye modlarına (Mod-I, Mod-II ve karışık Mod) kolay adapte olması ve deney koşullarının basitliğinden dolayı diğer önerilmiş deney yöntemlerine göre daha çok tercih edilmesine neden olmaktadır (Fowell vd., 2006).

ISRM (2007)'nin önerdiği örnek boyutları Çizelge 3'de verilmiştir. Önerilmiş örnek boyutlarının olmasına karşın, farklı boyutlardaki örneklerle de kırılma tokluğu deneyi yapılabilmektedir. Ancak deneyin geçerli olabilmesi için, farklı boyutta hazırlanan örneğin Şekil 3'te verilen grafikteki geçerli bölgede kalması gerekmekte, aksi halde deney geçersiz olarak değerlendirilmektedir.

CCNBD örneğini hazırlamak için disk şeklindeki örneğin her iki merkezine testere ile çentik açılarak "V" şekilli başlangıç çatlakı oluşturulmaktadır (bkz. Şekil 2). Deney sırasında bu çatlak doğrultusunda oldukça yavaş yüklemeye yapılarak örneğin kırılması sağlanmakta ve en yüksek yük değeri ( $P_{\max}$ ) kaydedilmektedir. Örneğin kritik boyutsuzluk değeri Eşitlik 1'den belirlendikten sonra kayacın kırılma tokluğu değeri Eşitlik 2'den hesaplanmaktadır. Kritik boyutsuzluk faktörü ( $Y_{\min}^*$ ), CCNBD örneğinin farklı geometrik şekilleri kullanılarak sayısal analiz sonuçlarından hesaplanmış ve Çizelge 4'te verilmiştir (ISRM, 2007).

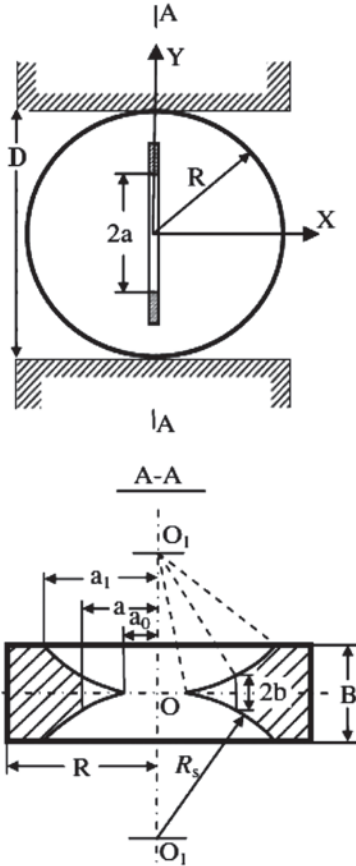
$$Y_{\min}^* = ue^{v\alpha_1} \quad (1)$$

$$K_{Ic} = \frac{P_{\max}}{B\sqrt{D}} Y_{\min}^* \quad (2)$$

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan kayaç türleri ve alındıkları yerler.

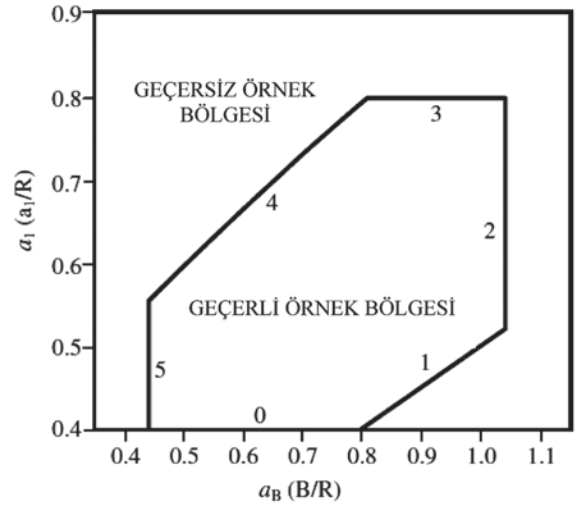
Table 2. The rock types used in this study and their sampling locations.

Kaya türü	Jeolojik kökeni	Alındığı yer
Kireçtaşı	Sedimanter	Antalya-Demre
Traverten	Sedimanter	Burdur-Bucak
Traverten	Sedimanter	Denizli-Kaklık
Kireçtaşı	Sedimanter	Afyon-Çay
Kireçtaşı	Sedimanter	Burdur-Karamanlı
Kireçtaşı	Sedimanter	Burdur-Karamanlı
Kireçtaşı	Sedimanter	Burdur-Ağlasun
Kireçtaşı	Sedimanter	Karaman
Kireçtaşı	Sedimanter	Kastamonu-Devrekani
Mermer	Metamorfik	Balıkesir-Marmara Adası
Mermer	Metamorfik	Afyon-İsçehisar
Mermer	Metamorfik	Muğla-Yatağan
Traki-Andezit	Mağmatik	Isparta-Sav
Trakit	Mağmatik	Isparta-Gönen
Bazalt	Mağmatik	Isparta-Kayı köyü



Şekil 2. CCNBD örneğinin konfigurasyonu (Fowell vd., 2006).

Figure 2. Basic configuration of CCNBD fracture toughness test specimen (Fowell et al., 2006).



Şekil 3. CCNBD örneğinin geçerli olabilmesi için kullanılan abak (ISRM, 2007).

Figure 3. The graph used for the validation of CCNBD specimen (ISRM, 2007).

Burada,  $D$  örnek çapı (m),  $B$  örneğin kalınlığı (m),  $P_{mak}$  kırılma yükü (MN),  $Y^*$ 'min kritik boyutsuzluk faktörü,  $\nu$  ve  $\nu'$ ;  $\alpha_0$  ( $a_0/R$ ) ve  $\alpha_B$  ( $B/R$ ) değerleri kullanılarak Çizelge 4'ten bulunan katsayıları ve  $\alpha_1$  düz yüzeydeki çatlak uzunluğunun örnek çapına oranı ( $a/R$ )'dır.

Çizelge 3. Standart CCNBD örneğinin geometrik boyutları (ISRM, 2007).

Table 3. Geometrical dimensions of the standard CCNBD specimen (ISRM, 2007).

Tanım	Değer	Boyutsuzluk ifadesi
Örnek Çapı, D (mm)	75.0	
Örnek kalınlığı, B (mm)	30.0	$\alpha_B = B/R = 0.80$
Başlangıç çatlaklarının uzunluğu, $\alpha_0$ (mm)	9.89	$\alpha_0 = a_0/R = 0.2637$
Çatlakların son uzunluğu, $\alpha_1$ (mm)	24.37	$\alpha_1 = a_1/R = 0.65$
Testere çapı, $D_s$ (mm)	52.0	$\alpha_s = D_s/R = 0.6933$
Kesme derinliği, $h_c$ (mm)	16.95	
$Y^*_{min}$	0.84	
Kritik çatlak uzunluğu, $\alpha_m$ (mm)	19.31	$\alpha_m = a_m/R = 0.5149$

Çizelge 4. Kritik boyutsuzluk faktörünün ( $Y^*_{min}$ ) belirlenmesinde kullanılan u ve v değerleri (ISRM, 2007).Table 4. u and v values used for the determination of the critical dimensionless factor ( $Y^*_{min}$ ) (ISRM, 2007).

aB	a0							
	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450
	u değerleri							
0.44	0.2747	0.2774	0.2808	0.2844	0.2883	0.2943	0.3024	0.3120
0.52	0.2708	0.2727	0.2757	0.2788	0.2828	0.2887	0.2968	0.3060
0.60	0.2667	0.2684	0.2709	0.2739	0.2782	0.2844	0.2921	0.3015
0.68	0.2632	0.2646	0.2667	0.2704	0.2744	0.2807	0.2888	0.2971
0.76	0.2598	0.2612	0.2637	0.2668	0.2719	0.2781	0.2860	0.2934
0.84	0.2572	0.2586	0.2612	0.2649	0.2699	0.2763	0.2831	0.2891
0.92	0.2553	0.2572	0.2598	0.2634	0.2684	0.2747	0.2811	0.2856
1.00	0.2547	0.2564	0.2591	0.2630	0.2679	0.2738	0.2786	0.2794

aB	a0							
	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450
	v değerleri							
0.44	1.7813	1.7820	1.7833	1.7893	1.7967	1.7977	1.7932	1.7850
0.52	1.7694	1.7734	1.7769	1.7845	1.7907	1.7920	1.7860	1.7784
0.60	1.7620	1.7668	1.7727	1.7792	1.7835	1.7831	1.7782	1.7689
0.68	1.7550	1.7602	1.7676	1.7711	1.7759	1.7741	1.7666	1.7612
0.76	1.7497	1.7553	1.7600	1.7656	1.7652	1.7624	1.7554	1.7528
0.84	1.7430	1.7487	1.7522	1.7547	1.7548	1.7499	1.7473	1.7497
0.92	1.7357	1.7390	1.7423	1.7446	1.7432	1.7389	1.7363	1.7448
1.00	1.7243	1.7279	1.7308	1.7307	1.7297	1.7270	1.7302	1.7525

$\alpha_0$ : Başlangıç çatlaklarının uzunluğu/Disk örneğinin yarıçapı ( $a_0/R$ )

$\alpha_B$ : Örnek kalınlığı/disk örneğinin yarıçapı ( $B/R$ )

## DENEYSSEL ÇALIŞMA

Kayaçların fiziko-mekanik özellikleri; ISRM (2007), Evans ve Pomeroy (1966), TS 699 (2009), TS EN 1936 (2007), TS EN 14157 (2005),

TS EN 1926 (2007) ve TS EN 12372 (2007) ilgili kaynaklar ve önerilen deney yöntemleri çerçevesinde belirlenmiştir. Yoğunluk ( $\rho$ ) deneyinde kayaç örnekleri, 200  $\mu$ m boyutunun altına incek şekilde öğütülerek kullanılmıştır. Görünür

gözeneklilik ( $\delta$ ), Shore sertliği ( $SH$ ) ve tek eksenli sıkışma dayanımı ( $\sigma_k$ ) deneylerinde kenar uzunluğu 50 mm olan küp örnekler, Böhme yüzey aşınma ( $BYA$ ) deneylerinde kenar uzunluğu 71 mm olan küp örnekler, darbe dayanım indeksinde ( $ISI$ ) 3.2-9.5 mm boyut aralığında hazırlanmış parça örnekler, Schmidt darbe çekici ( $SDÇ$ ) deneyinde 50x100x200 mm prizmatik örnekler, nokta yükü dayanım indeksi ( $I\sigma_{(50)}$ ) deneyinde blok örnekler, Brazilian çekme dayanımı ( $\sigma_t$ ) deneylerinde boy/çap oranı 0.5 olan NX çaplı disk örnekler ve eğilme dayanımı ( $\sigma_b$ ) deneyinde 25x50x150 mm boyutlarında prizmatik örnekler kullanılmıştır. Shore sertliği deneyinde C-2 tipi Shore Scleroscope ve Schmidt darbe çekici deneylerinde ise darbe enerjisi 0.74 Nm olan L-tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. Fizikomekanik deneylerden elde edilen verilerin aritmetik ortalama değerleri dikkate alınmış ve sonuçları topluca Çizelge 5'te verilmiştir.

Kayaçların kırılma tokluklarının belirlenmesi amacıyla ülkemizin değişik bölgelerinden (bknz. Çizelge 2) alınan 15 farklı kaya türü kullanılmıştır. Bu kayaçlardan NX (54 mm) çaplı karotlar alınmış ve 20 mm kalınlığında disk şeklinde örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu örneklerin her iki düz yüzeyinin ortasına 1.5 mm kalınlıkta ve 50 mm çapında bir testere kullanılıp torna tezgahında kanallar açılarak CCNBD örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerin geometrileri Şekil 3'te verilen abakta yerine konmuş ve örneklerin geçerli bölgede kaldığı görülmüştür. Her kayaç türü için 6 adet örnek üzerinde, yüklenme hızı 0.25 mm/s olacak şekilde kırılma tokluğu deneyleri yapılmıştır. Ölçülen kırılma yük değerleri ve örnek boyutları Eşitlik 1 ve 2'de yerine konarak her bir örneğe ait kırılma tokluğu ( $K_{ic}$ ) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan  $K_{ic}$  değerlerinin aritmetik ortalamaları dikkate alınmış ve Çizelge 5'te verilmiştir.

### **KIRILMA TOKLUĞU İLE FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLER ARASINDAKİ İLİŞKİLER**

Kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin kırılma tokluğunun tahmini için kullanılabilirliğini ölçebilmek amacıyla, deneyler sonucunda elde edilen verilerle kapsamlı bir istatistiksel analiz yapılmıştır. Verilerin istatistiksel analizi; korelasyon

analizi, doğrusal regresyon analizi ve eğri tahmini işlemlerini içermiştir. Elde edilen ilişkiler arasında deneysel sonuçları en iyi temsil eden ilişki belirlenmiştir. İstatistiksel çalışmalarda SPSS 11.5 paket programı kullanılmıştır.

Kırılma tokluğu ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4'te verilmiştir. Buna göre, yüksek korelasyon katsayılı doğrusal artan bir ilişki bulunmuştur. Kırılma tokluğu ile görünür gözeneklilik arasında ise, çok düşük bir ilişki belirlenmiştir (Şekil 5).

Çalışmada kullanılan kayaçların kırılma toklukları ile Schmidt geri sıçrama değerleri arasında üssel olarak artan, Shore sertlikleriyle doğrusal artan ilişkiler belirlenmiştir (Şekil 6 ve 7). Kayaçların kırılma tokluğu ile Böhme yüzey aşınma arasında logaritmik azalan bir ilişki saptanırken, darbe dayanım indeksiyle üssel olarak artan ilişkiler bulunmuştur (Şekil 8 ve 9).

Çalışmada kullanılan kayaçların kırılma toklukları ile nokta yükü dayanım indeksleri ve eğilme dayanımları arasında doğrusal artan ilişkiler bulunurken (Şekil 10 ve 13), sıkışma ve çekme dayanımları arasında ise üssel olarak artan ilişkiler belirlenmiştir (Şekil 11 ve 12).

Regresyon analizlerine koşul olarak yapılan varyans analizlerinin (ANOVA) sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir. Buna göre, bağıntıların anlamlılık düzeyleri, Şekil 5'teki eşitlik dışında, her bir eşitlik için 0.05'ten daha küçüktür. Ayrıca, eşitliklere uygulanan F-testi sonucunda, dışında tablo değeri olan 4.67'den (%95 güven aralığında) oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Oluşturulan modellerin belirlenen verilerle uyumunun bir göstergesi olan belirleme katsayıları ( $R^2$ ) dikkate alındığında, kayaçların kırılma tokluğu değerlerinin değişiminin, istatistiksel olarak %71'inin Brazilian çekme dayanımı ile açıklanabileceği anlaşılmaktadır.

### **TARTIŞMA VE SONUÇ**

Kayaçların kırılma tokluğu önemli bir mekanik özellik olmasına rağmen, bu deneyin laboratuvarında yapılması oldukça güçtür. Eğer kırılma tokluğu ile diğer kayaç özellikleri arasında önemli bir ilişki bulunursa, bu ilişkiler kullanılarak kırılma tokluğunun tahmini çok kolay



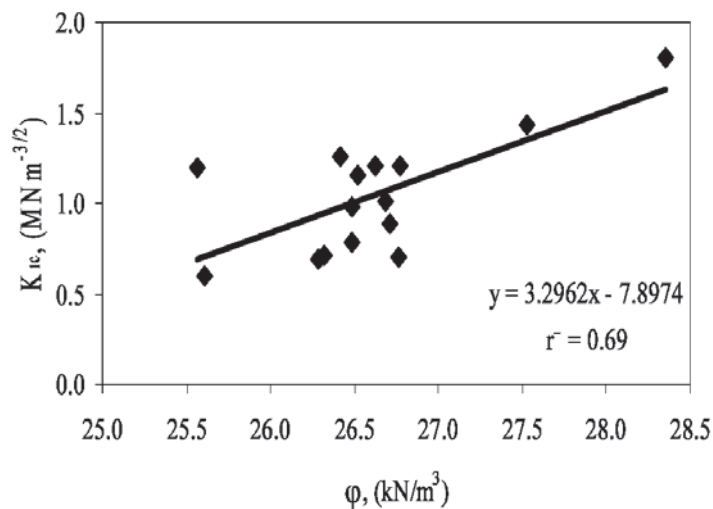
Çizelge 5. Kayaçların Mod-I kırılma tokluğu değerleri ve fiziko-mekanik özellikleri (Şengün, 2009).

Table 5. Fracture toughness (Mode-I) and physico-mechanical properties of rocks (Şengün, 2009).

Kaya türü	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\delta$ (%)	SDÇ	SH	BYA (cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> )	ISI (%)	$I_s^{[50]}$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_{e\beta}$ (MPa)	$K_{Ic}$ (MNm <sup>-3/2</sup> )
Kireçtaşı-1	26.284	9.322	33.6	31.8	32.9	81.3	3.55	43.35	5.27	12.03	0.695
Traverten-1	26.322	2.606	34.6	36.7	28.0	85.8	3.99	60.70	4.35	11.52	0.711
Traverten-2	26.482	5.102	32.9	43.9	29.0	83.1	3.58	62.52	3.35	11.06	0.783
Kireçtaşı-2	26.489	1.546	52.0	53.6	14.5	84.9	5.39	145.50	6.96	15.12	0.984
Kireçtaşı-3	27.530	4.207	47.2	46.8	11.0	86.0	5.28	100.55	7.67	11.91	1.432
Kireçtaşı-4	26.415	0.275	49.6	62.6	11.6	84.8	5.33	129.92	7.99	14.01	1.261
Kireçtaşı-5	26.517	0.687	46.0	56.6	13.0	89.2	4.66	109.83	5.57	13.40	1.157
Kireçtaşı-6	26.627	0.333	47.3	59.0	11.6	83.6	5.18	119.39	8.19	13.14	1.210
Kireçtaşı-7	26.711	0.475	49.6	63.2	13.5	84.3	4.71	145.94	7.01	15.26	0.891
Mermer-1	26.685	0.327	43.0	41.6	21.3	74.6	3.26	74.62	5.98	13.48	1.015
Mermer-2	26.775	0.192	38.5	43.5	29.8	82.3	3.46	70.30	5.45	11.73	1.208
Mermer-3	26.765	0.118	39.0	47.5	24.0	74.5	3.52	85.73	4.65	12.81	0.705
Traki-Andezit	25.569	6.855	42.6	77.1	10.2	89.3	8.08	120.44	8.21	21.05	1.195
Trakit	25.610	7.985	41.1	63.5	19.4	75.5	3.43	81.12	3.88	6.34	0.601
Bazalt	28.356	4.909	46.2	78.8	6.8	89.0	9.97	139.42	9.57	26.16	1.801

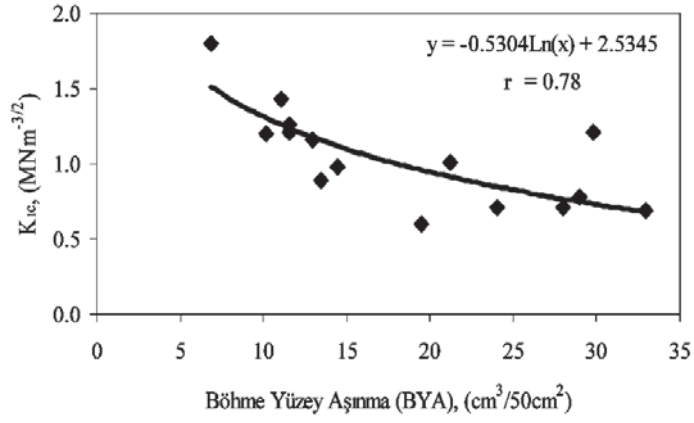
$\rho$ : Birim hacim ağırlık,  $\delta$ : Görünür gözeneklilik, SDÇ: Schmidt geri sıçrama değeri, SH: Shore sertliği, BYA: Böhme yüzey aşınma, ISI: Darbe dayanım indeksi,  $I_s^{[50]}$ : Nokta yükü dayanım indeksi,  $\sigma_c$ : tek eksenli sıkışma dayanımı,  $\sigma_t$ : Brazilian çekme dayanımı,  $\sigma_{e\beta}$ : Eğilme dayanımı  $K_{Ic}$ : Mod-I kırılma tokluğu

Not: Deneylerde kullanılan örnek sayısı önerilen deney standartlarında ön görülen örnek sayıları kadar olup, kırılma tokluğu deneyleri 6 adet örnek üzerinde yapılmış ve aritmetik ortalamaları dikkate alınmıştır.

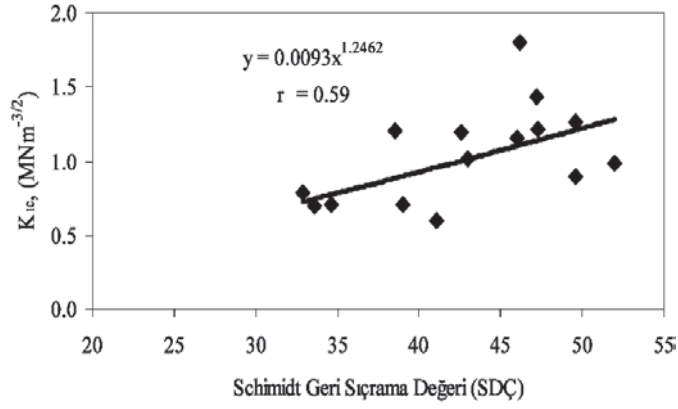


Şekil 4. Kırılma tokluğu ile birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.

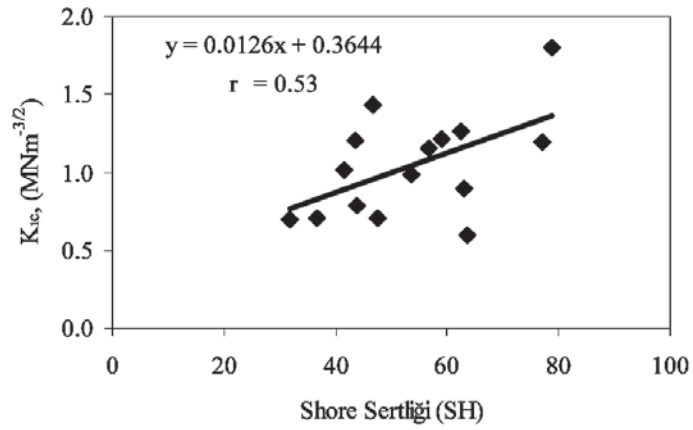
Figure 4. Relationship between fracture toughness and unit weight.



Şekil 5. Kırılma tokluğu ile görünür gözeneklilik arasındaki ilişki.  
Figure 5. Relationship between fracture toughness and apparent porosity.

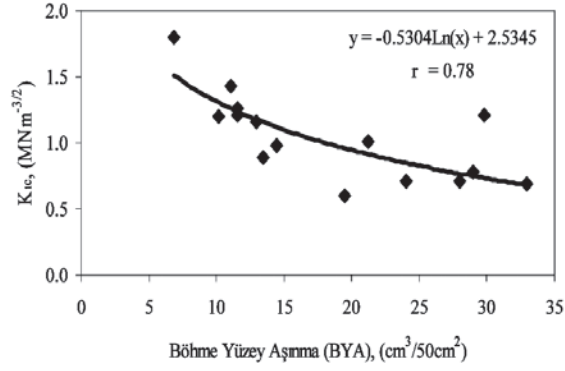


Şekil 6. Kırılma tokluğu ile Schmidt çekici geri sıçrama değeri arasındaki ilişki.  
Figure 6. Relationship between fracture toughness and Schmidt rebound number.

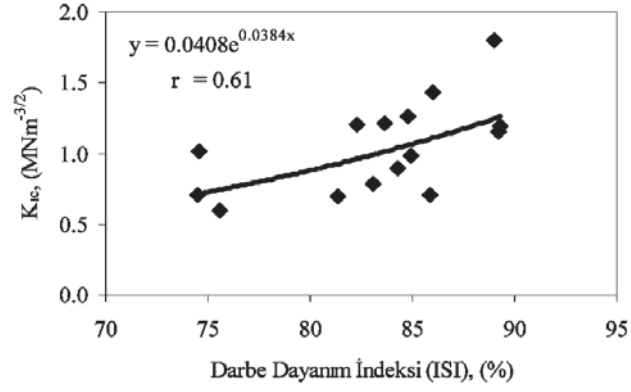


Şekil 7. Kırılma tokluğu ile Shore sertliği arasındaki ilişki.  
Figure 7. Relationship between fracture toughness and Shore hardness.

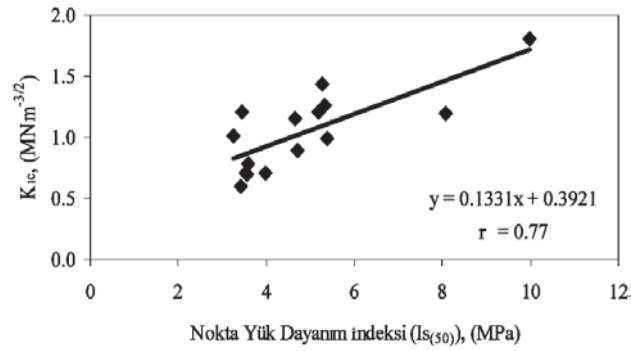




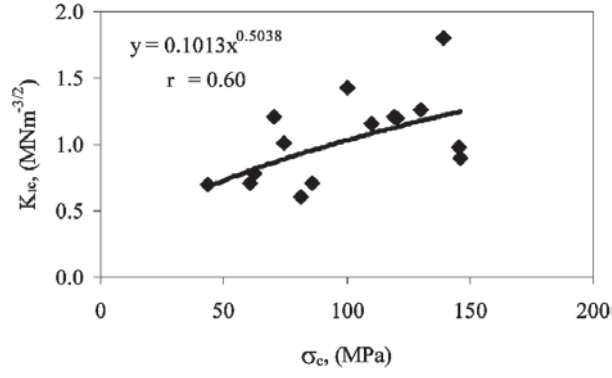
Şekil 8. Kırılma tokluğu ile Böhme yüzey aşınma arasındaki ilişki.  
Figure 8. Relationship between fracture toughness and Böhme surface abrasion.



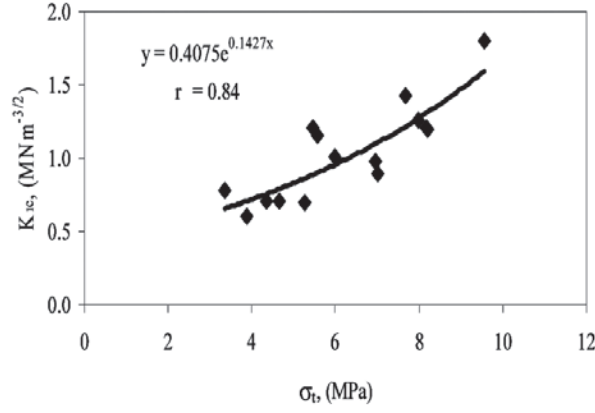
Şekil 9. Kırılma tokluğu ile darbe dayanım katsayısı arasındaki ilişki.  
Figure 9. Relationship between fracture toughness and impact strength index.



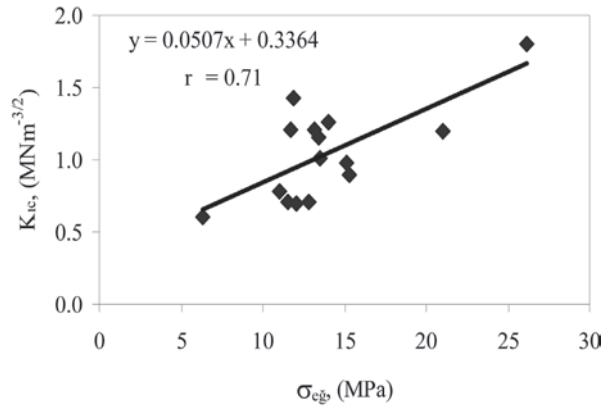
Şekil 10. Kırılma tokluğu ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki.  
Figure 10. Relationship between fracture toughness and point load strength index.



Şekil 11. Kırılma tokluğu ile tek eksenli sıkışma dayanım indeksi arasındaki ilişki.  
Figure 11. Relationship between fracture toughness and uniaxial compressive strength.



Şekil 12. Kırılma tokluğu ile Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişki.  
Figure 12. Relationship between fracture toughness and Brazilian tensile strength.



Şekil 13. Kırılma tokluğu ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki.  
Figure 13. Relationship between fracture toughness and bending strength.

Çizelge 6. Görgül eşitliklerin ANOVA analizi sonuçları.  
Table 6. ANOVA results of the empirical equations.

Belirleme katsayısı $R^2$	Standard hata	Varyansın kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi
0.48	0.246	Regresyon	1	0.7140	0.7140	11.8024	0.0044
		Kalan	13	0.7865	0.0605		
0.07	0.311	Regresyon	1	0.0971	0.0971	1.0013	0.3353
		Kalan	13	1.2605	0.0970		
0.35	0.261	Regresyon	1	0.4743	0.4743	6.9801	0.0203
		Kalan	13	0.8833	0.0679		
0.28	0.287	Regresyon	1	0.4274	0.4274	5.1778	0.0405
		Kalan	13	1.0731	0.0825		
0.60	0.215	Regresyon	1	0.9013	0.9013	19.5509	0.0007
		Kalan	13	0.5993	0.0461		
0.37	0.256	Regresyon	1	0.5073	0.5073	7.7573	0.0155
		Kalan	13	0.8502	0.0654		
0.59	0.218	Regresyon	1	0.8822	0.8822	18.5495	0.0009
		Kalan	13	0.6183	0.0476		
0.36	0.259	Regresyon	1	0.4860	0.4860	7.2491	0.0185
		Kalan	13	0.8716	0.0670		
0.71	0.175	Regresyon	1	0.9573	0.9573	31.0876	0.0001
		Kalan	13	0.4003	0.0308		
0.50	0.241	Regresyon	1	0.7461	0.7461	12.8578	0.0033
		Kalan	13	0.7544	0.0580		

olmaktadır. Bu amaçla bu çalışmada, kayaçların Mod-I kırılma toklukları, V-çentikli Brazilian diski (CCNBD) deney yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada, 9 adet sedimanter, 3 adet metamorfik ve 3 adet mağmatik kökenli olmak üzere toplam 15 farklı kaya türü kullanılmıştır. Bu kayaçların kırılma tokluk değerleri 0.6 ile 1.8 MNm<sup>-3/2</sup> arasında değişmektedir. Kayaçların kırılmaya karşı gösterdikleri direncin göstergesi olarak tanımlanan kırılma tokluğu, kayacın mekanik özellikleri ile artan bir ilişki göstermektedir.

Chang vd. (2002) mermer ve granit örnekleri üzerinde yaptıkları çalışmada kırılma tokluğu (tür-I) ile tek eksenli sıkışma dayanımı (dayanım değerleri 50 ile 170 MPa arasında değişen) arasında korelasyon katsayısı  $r=0.55$  olan doğrusal bir ilişki ve gözeneklilik ile kırılma tokluğu arasında  $r=0.60$  korelasyon katsayılı doğrusal azalan bir ilişki elde

etmişlerdir. Bu çalışmada ise, tek eksenli sıkışma dayanımı 43 ile 146 MPa arasında değişen kayaçlar için kırılma tokluğu ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında  $r=0.60$  korelasyon katsayılı artan bir üssel ilişki elde edilmiştir.

Bearman (1999) ise, nokta yükü dayanım indeksi 2 ile 14 MPa arasında değişen on iki farklı kayaç üzerinde kırılma tokluğu (tür-I) ile nokta yükü dayanım indeksi arasında  $r=0.95$  korelasyon katsayılı lineer artan bir ilişki elde edilmiştir. Bu çalışmada ise, 3.26 ile 9.97 MPa dayanıma sahip kayaçlar incelenmiş ve  $r=0.77$  korelasyon katsayılı lineer artan bir ilişki elde edilmiştir. Her iki çalışmanın sonuçlarına ait değerlendirmeler birbirine paralel olmaktadır.

Zhang (2002), çekme dayanımı 0.12 ile 21.5 MPa arasında değişen 74 farklı kayaca ait çekme dayanımları ile çok farklı kırılma tokluğu yöntemlerine

göre hesaplanan kırılma tokluğu değerleri arasında  $r=0.97$  korelasyon katsayılı doğrusal artan bir ilişki elde edilmiştir. Bu çalışmada da, çekme dayanımı 3.35 ile 9.57 MPa arasında değişen Brazilian çekme dayanımı değerleri ile kırılma tokluğu arasında  $r=0.84$  korelasyon katsayılı üstel artan bir ilişki elde edilmiştir.

Adefsahe (2006), gözenekliliği %25 ile %17 arasında değişen farklı kayaçlara ait kırılma tokluğu ile gözeneklilik arasında üssel azalan  $r=0.96$  korelasyon katsayılı bir ilişki elde etmişlerdir. Gözeneklilik değerleri %0.118 ile %9.322 arasında sunulan bir çalışmada değişen gözeneklilik değerleri ile  $r=0.52$  gibi düşük korelasyon katsayılı üstel bir ilişki elde edilmiştir.

Kaya malzemesi özelliklerinden dayanım ile kırılma tokluğu arasında yüksek anlamlı ilişkiler elde edilirken, sertlik ve birim hacim ağırlık özellikleriyle daha düşük anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Kayaç gözenekliliğinin kırılma tokluğu üzerinde bir etkisi bulunmamıştır. Değerlendirmeler sonucunda, kayaçların kırılma tokluğu ile en anlamlı ilişki kayacın dayanım özelliklerinden olan çekme dayanımı ( $r = 0.84$ ) arasında elde edilmiştir. Bu da, Mod-I (açılma modu) kırılma tokluğu deneyinde çekme gerilmeleri altında çatlak ilerlemesinin meydana gelmesinden dolayı en yüksek ilişkinin çekme dayanımı ile olmasını desteklemektedir. Bu nedenle uygulanabilirliği daha kolay, daha ekonomik ve daha az zaman harcanarak yapılan çekme dayanımı deneyinden Şekil 12'deki eşitlik kullanarak kayaçların kırılma tokluklarının güvenilir bir şekilde tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

## KATKI BELİRTME

Yazarlar, bu çalışmaya verdiği destekten dolayı Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Fonu Yönetim Birimi'ne (Proje No: 1588-D-07) teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

Adefashe, H.A., 2006, Determining the fracture mechanics properties of sedimentary rocks using double torsion testing. Thesis of Master of Science, The University of Texas at Austin (unpublished).

Altındağ, R., 2000. Kayaçalarda kırılma tokluğu ve diğer mekanik özellikler arasındaki

ilişkiler. 9 Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 2(2), 39-47.

- Bearman R.A., 1991. The application of rock mechanics parameters to the prediction of crusher performance. PhD Thesis, Camborne School of Mines, UK (unpublished).
- Bearman, R.A., 1999. The use of the point load test for the rapid estimation of mode I fracture toughness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 36, 257–263.
- Bieniawski, Z.T., 1967. Mechanism of brittle fracture of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 4, 395-406.
- Boone, T.J., Wawrzynek, P.A., and Ingraffea, A.R., 1986. Simulation of the fracture process in rock with application to hydrofracturing. *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics. Abstract*, 23, 255–265.
- Brown, G.J., and Reddish, D.J., 1997. Experimental relations between rock fracture toughness and density. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 34 (1), 153-155.
- Donovan, J.G., and Karfakis, M.G., 2004. Adaptation of a simple wedge test for the rapid determination of Mod I fracture toughness and the assessment of relative fracture resistance. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 41, 695 – 701.
- Evans, I., and Pomeroy, C.D., 1966. *The Strength Fracture and Workability of Coal*. Oxford, Pergamon Press Ltd., London.
- Fowell R.J., and Chen, J.F., 1990. The third chevron-notched rock fracture specimen-the cracked chevron-notched Brazilian disc. In: *Rock Mechanics: Contributions and Challenges*, W.A., Hustrulid and G.A., Johnson (eds.), Taylor and Francis, pp.295-302.
- Fowell, R.J., Xu, C., and Dowd, P.A., 2006. An update on the fracture toughness testing methods related to the cracked chevron-notched Brazilian disk (CCNBD) specimen. *Pure Application Geophysics*. 163, 1047–1057.

- Griffith, A.A., 1921. The phenomena of rapture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A221, 163-197.
- Gunsallus, K.L., and Kulhawy, F.H., 1984. A comparative evaluation of rock strength measures. *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics Abstract*, 21 (5), 233-248.
- Irwin, G.R., 1957. Analysis of stress and strain near the end of crack traversing a plate. *Transaction ASME, Journal of Applications Mechanics*, 24, 361-364.
- ISRM, 1988. Suggested methods for determining the fracture toughness of rocks. *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics Abstract*, 25, 71-96.
- ISRM, 1995. Suggested method for determining Mod-I of fracture toughness using Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD) specimens. *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics Abstract*, 32, 57-64.
- ISRM, 2007. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested Methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM, R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Kozan Ofset, Ankara.*
- Kim, K., 2006. Blasting design using fracture toughness and image analysis of the bench face and muckpile. *Master of Science, Mining and Mineral Engineering, Virginia Tech, Blacksburg.*
- Köksal, N., 1991. Ankara andeziti kırılma tokluğunun araştırılması. 12. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, Ankara, s. 403-416.
- Nelson, P.P., and Fong, F.L.C., 1986. Characterization of rock for boreability evaluation using fracture material properties. *Proceedings of the 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, pp. 846-852.
- Ouchterlony F., 1974. Fracture mechanics applied to rock blasting. *Proceedings of 3rd Congress ISRM, Denver*, pp.1377-1383.
- Roegiers, J.C., McLennan, J.D., and Schultz, L.D., 1982. In-situ stress determinations in northeastern Ohio, issues in rock mechanics. *Proceedings of 23rd Symposium on Rock Mechanics, Society of Mining Engineers of the AIME, New York*, pp. 219-229.
- Shetty, D.K., Rosenfield, A.R., and Duckworth, W.H., 1985. Fracture toughness of ceramics measured a chevron-notched diametral-compression test. *Journal of American Ceramic Society*, 68 (12), C325-C32.
- Şengün, N., 2009. Kayaçların kırılma tokluğu ve gevrekliğinin dairesel testereler ile kesme verimi üzerine etkileri. *Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta (yayımlanmamış).*
- TS EN 14157, 2005. Doğal taş - aşınma direncinin tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 12372, 2007. Doğal taşlar - deney metotları - yoğun yük altında bükülme dayanımı tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, AnTS EN 1926, 2007. Doğal taşlar- deney metotları- basınç dayanımı tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 1926, 2007. Doğal taşlar- deney metotları - basınç dayanımı tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 1936, 2007. Doğal taşlar- deney metotları- gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS 699, 2009. Doğal yapı taşları - İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- Whittaker, B.N., Singh, R.N., and Sun, G., 1992. *Rock Fracture Mechanics: Principles, Design and Applications. Elsevier, Amsterdam.*
- Zhang, Z.X., 2002. An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 39, 401-406.

