



KAYAÇLARDA KIRILMA TOKLUĞU VE DİĞER MEKANİK ÖZELLİKLER ARASINDAKİ İLİŞKİLER

(*THE RELATIONSHIPS BETWEEN FRACTURE TOUGHNESS AND OTHER MECHANICAL PROPERTIES OF ROCKS*)

Raşit ALTINDAĞ*

ÖZET/ABSTRACT

Kayaçların kırılma tokluğu değerlerini belirlemek için araştırmacılar tarafından çok sayıda deney yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden Brazilian diskı üzerinde tek kama çatlağı yöntemi (SECBD) seçilerek farklı orijinli kayaçların kırılma tokluğu değerleri belirlenmiştir. Bu kayaçların mekanik özellikleri ile kırılma tokluğu değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Various testing methods have been used to determine the fracture toughness of rocks by most of researchers. The Single Edge Crack Brazilian Disk (SECBD) method which is one of the used methods in the literature was used, and the fracture toughness values of the different origin rocks were determined. The relations between the fracture toughness and mechanical properties were examined.

ANAHTAR KELİMELELER / KEY WORDS

Kırılma tokluğu, Çatlak gelişimi, Gevreklik, Tek eksenli basıncı dayanımı, Çekme dayanımı, Koni delici değeri

Fracture toughness, Crack propagation, Brittleness, Uniaxial compressive strength, Tensile strength, Cone indenter value

1. GİRİŞ

Kırılma tokluğu, kırılma mekanizmasında çatlak oluşumu ve gelişimi gibi kırılma direncine karşı kayaç direncini gösteren temel parametrelerden biridir. Bir malzemenin kırılma tokluğu, onun çatlak gelişimine karşı direncini veya yeni yüzey alanları oluşturmak için gerekli kırılma enerjisi tüketim hızını ifade eder. Kaya mühendisliğinde önemli ve faydalı bir parametre olarak gösterilmektedir (Whittaker vd., 1992). Kırılma tokluğu, çatlak gelişimine karşı kırılma direncinin bir ölçüsüdür. Yani daha yüksek kırılma tokluğu, çatlak yayılımına karşı kırılma direncinin arttığını göstermektedir. Kırılma tokluğu çalışmaları, kırılma işlemleri sırasında kömür kırmak için gerekli enerjiyi incelemek (Szendi-Howarth, 1982) ve kayacı ufalamak için konik kırıcıların güç ihtiyaçlarının belirlenmesinde dikkate alınmıştır (Bearman vd., 1989; Bearman ve Barleys, 1991).

Kayaçların delinmesi, kazılması, patlatılması, kırılması ve tünel açma gibi parçalanma işlemlerinde kayacın kendi özellikleri ön planda gelmektedir.

Kayaçlar için kırılma tokluğu değerlerinin bazı uygulama alanlarını şöyle sıralanabilir (ISRM, 1988) :

- a-Kayaçların sınıflandırılması için (Gunsallus ve Kulhawy, 1984),
- b-Model ölçekli patlatma ve tünel açma (Nelson ve Fong, 1986),
- c-Hidrolik parçalanma, kayaç kesimi ve krater patlatma gibi kayaç parçalanma modellemesinde kayacın bir özelliği olarak,
- d-Boyut küçültmede uygun kırıcı türünün seçimi.

Ayrıca, kırılma tokluğu, barajların stabilitesini analiz etmede (Huang vd., 1987) ve beton dolgulu barajlarda çatlamaı incelemek amacıyla da uygulanmaktadır (Lajtai ve Bielus, 1986).

2. DENEY YÖNTEMİ

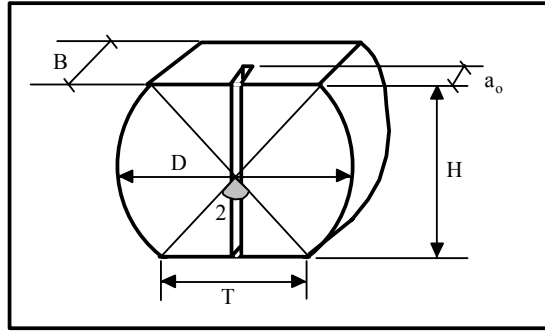
2.1. Kırılma Tokluğu Deneyi

Günümüzde, kırılma tokluğu deneylerinde çok farklı numune boyutu ve şeklinin yanısıra, çok farklı deney yöntemleri de kullanılmaktadır (Whittaker vd., 1992). Bu nedenle deney sonuçları çoğu zaman birbirleriyle karşılaştırılamamaktadır. Standart bir deney yönteminin kullanılabilmesi için Singh ve Pathan tarafından iki ayrı yöntem önerilmiştir.

Singh ve Pathan (ISRM, 1988)'nin önerdiği deney yöntemindeki numune boyutlarını mevcut olanaklarla hazırlamanın mümkün olmaması nedeniyle, ilk defa (Szendi-Howarth, 1982) tarafından önerilen ve daha sonra (Singh ve Pathan, 1988) tarafından kullanılan SECBD deney yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntem, numunenin hazırlanması ve kırılma tokluğu parametrelerinin hesaplanması açısından oldukça basittir.

Numunenin çapı boyunca, "a" derinliğinde, kesici disk ile bir kanal açılmış ve yükleme yüzeyleri bu kanala dik yönde olacak şekilde kesilerek düzeltilmiştir (Şekil 1). Hazırlanan bu numune, açılan kanal eksenine yükleme eksenine paralel olacak şekilde yükleme plakaları arasına yerleştirilerek kırılma kadar yükleme işlemine devam edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 1. Kırılma tokluğu deneyinde kullanılan numune geometrisi (Singh ve Pathan, 1988)

Deneylerde kullanılan numunelerin boyutları aşağıda verilmiştir.

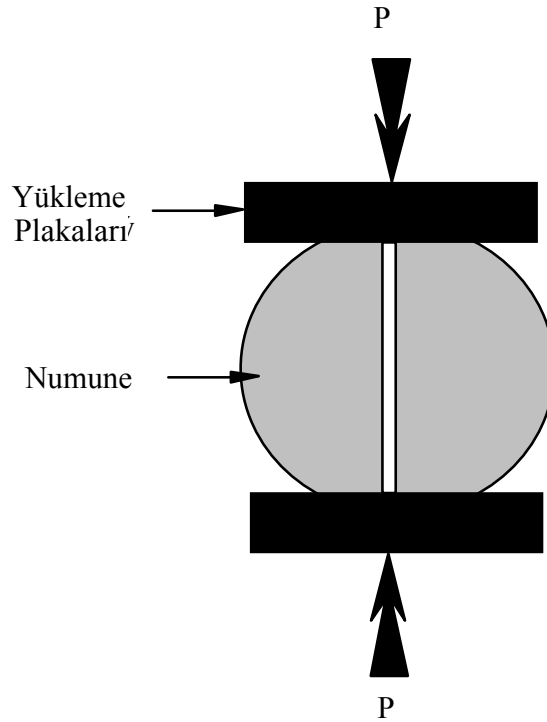
$$D = 54 \text{ mm}$$

$$T = 33 \text{ mm}$$

$$H = 42 \text{ mm}$$

$$B = 44 \text{ mm}$$

$$a = 11 \text{ mm}$$



Şekil 2. Kırılma tokluğu deneyinin şematik olarak gösterilişi (Altındağ, 1997)

Kayaçların kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesi için her kayaç örneğinden 3'er adet numune hazırlanmıştır. Deneysel veriler 1'nolu bağıntıda yerine konularak, her numunenin kırılma tokluğu (K_I) değerleri hesaplanmıştır (Altındağ, 1997). Deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak, her kayaç için kırılma tokluğu (K_I) değeri belirlenmiştir (Çizelge 1).

$$K_I = \frac{1,264(\sin 2\theta - \sin \theta)P\sqrt{a}}{T.B.\sin \theta} \quad (1)$$

Burada; K_1 = Kırılma tokluğu ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$), P = Kırılma yükü (MN), a = Çentik (yarık) derinliği (m), T = Yükleme yüzeyinin düzlem uzunluğu (m), B = Disk kalınlığı (m) ve $\theta = \text{Sin}^{-1}(T/D)$ (radyan olarak) dir.

2.2. Kayaçların Fiziko-Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Kayaçların fiziko-mekanik özellikleri literatürde önerilen standartlar çerçevesinde belirlenmiştir. Bu amaçla araziden alınan kayaç örnekleri, standartlara uygun olarak hazırlanmış, hazırlanan numunelerin tek eksenli basınç dayanımı deneyi TS 699 (1987), çekme dayanımı deneyi TS 7654 (1989), nokta yük dayanım indeksi deneyi ISRM (1985), elastisite modülü deneyi TS 2030 (1975) ve koni delici deneyi (Brook, 1993)'e göre yapılmıştır.

Deney verilerinin aritmetik ortalamaları alınarak her kayacın mekanik özellikleri belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kırılma tokluğu ve fiziko-mekanik özellikler

Kayaç No	Kayaç Adı	Yoğunluk(ρ) (gr/cm^3)	Tek Eks. Bas. Day (σ_C) (MPa)	Çekme Dayanımı (σ_T) (MPa)	Nokta Yük Day. İndeksi (I_s) (Mpa)	Kırılma Tokluğu (K_1) ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	Koni Delici Değeri (CI)	Gevreklik (σ_C/σ_T) (rg)	Elastisite Modülü (E_t) (GPa)
1	Mermer (Muğla)	2,76	54,12	7,78	4,17	1,187	2,95	6,956	10,420
2	Mermer (İzmir, Torbalı)	2,71	72,94	10,94	3,27	1,739	3,84	6,667	18,315
3	Mermer (Muğla)	2,73	36,57	6,51	2,38	0,939	3,34	5,618	16,156
4	Kireçtaşı (Isparta)	2,74	81,18	12,5	4,75	2,478	3,45	6,494	20,406
5	Kireçtaşı (Fethiye)	2,69	76,76	12,5	3,90	2,177	4,08	6,141	19,036
6	Kumtaşı (Isparta)	2,69	96,86	11,57	4,11	2,850	4,53	8,372	22,420
7	Andezit (Isparta)	2,61	112,45	12,76	7,76	2,920	7,1	8,813	19,932

3. KIRILMA TOKLUĞU İLE MEKANİK ÖZELLİKLER ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Kayacın delinmesi, kazılması vb. çalışmalarda önemli parametrelerden birisi de kırılma tokluğudur. Bu değer yüksek oluşu kayacın kırılmaya karşı gösterdiği direncin yüksek olduğuna işaret etmektedir. Buna göre, kayacın diğer parametreleriyle kırılma tokluğu arasında ilişkilerin varlığı araştırılmıştır. Bu çerçevede, kırılma tokluğu (K_1) ile tek eksenli basınç dayanımı (σ_C), Brazilian çekme dayanımı (σ_T), nokta yük dayanım indeksi (I_s), Elastisite modülü (E_t), koni delici değeri (cone indenter) (CI) ve tek eksenli basınç dayanımının çekme dayanımına oranı olarak tanımlanan gevreklik (rg) değeri (Hucka ve Das, 1974) arasındaki ilişkiler regresyon analizleriyle incelenmiştir (Şekil 3, 4 ve 5). İncelenen bu parametreler arasından K_1 ile σ_C arasında diğerlerine nazaran daha yüksek anlamlılıkta bir

ilişki görülmüştür (Çizelge 2). Söz konusu bu ilişkiler grafiksel olarak incelendiğinde kayacın mekanik parametrelerinin artmasıyla K_1 değerlerinin de doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir.

Whittaker vd., 1992'den anlaşıldığına göre (Pathan, 1987)'in aynı deney metodunu (SECB) kullanarak silttaşı, kumtaşı, granit ve bazalt kayalarının üzerinde yaptığı çalışmadan elde edilen veriler arasındaki ilişkiler incelendiğinde; σ_C ve σ_T değerleri ile K_1 arasında lineer artan bir ilişkinin var olduğu görülmektedir.

Farklı bir deney metodu kullanılarak bazalt ve syenit kayaları üzerine yapılan çalışmada σ_C , σ_T ve E_t ile K_1 arasında artan bir ilişkinin olduğu görülmüştür (Huang ve Sijing, 1985).

Diğer taraftan, kırılma tokluğu ile birden fazla bağımsız değişken ele alınarak çoklu regrasyon analizleri % 95 güvenilirlikle yapılmış ve kırılma tokluğu ile yüksek korelasyonlu ilişki gösteren denklemler Çizelge 3'de verilmiştir. Bu ilişki denklemleri incelendiğinde, kayaların kırılma tokluğu ile mekanik parametrelerden tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanım indeksi ve koni delici değerlerinin birlikte kullanılmasıyla en yüksek korelasyon katsayılı ilişkinin elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 2: Kayaç özelliklerinin çeşitli regrasyon ilişkileri

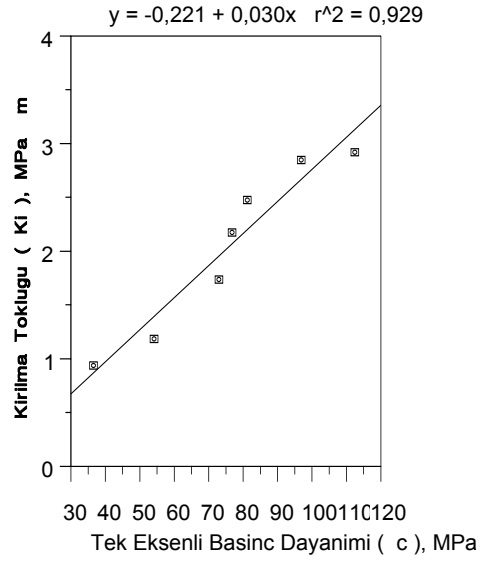
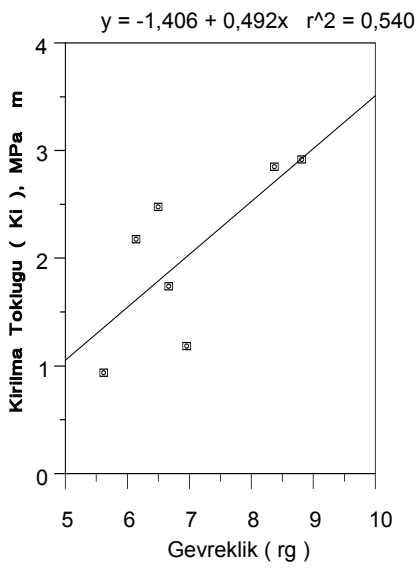
İlişki No	İlişki Denklemi	Korelasyon Katsayısı (r)
1	$K_1 = - 0,221 + 0,0030 \sigma_C$	0,964
2	$K_1 = - 0,957 + 0,281 \sigma_T$	0,900
3	$K_1 = - 0,916 + 0,163 E_t$	0,814
4	$K_1 = -0,820 + 4,731 \log (CI)$	0,751
5	$K_1 = 0,632 + 0,325 I_s$	0,702
6	$K_1 = - 1,406 + 0,492 (\sigma_C / \sigma_T)$	0,735

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kayaçların kırılmaya karşı gösterdikleri direncin göstergesi olarak tanımlanan kırılma tokluğu, kayacın mekanik özellikleri ile doğrusal artan bir ilişki göstermektedir. Kayaçların mekanik özelliklerinin artması kırılma tokluğunun da arttığına işaret etmektedir. Dolayısıyla, kayacın kırılma tokluğu mekanik özelliklerle yakından ilgili bir parametredir.

Yapılan çoklu regrasyon analizlerinden kırılma tokluğu ile en anlamlı ilişki; kayacın tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanım indeksi ve koni delici değerlerinin birlikte kullanılmasıyla elde edilmiştir. Böylece birden fazla değişkenin birlikte kullanılmasıyla kayacın kırılma tokluğunun daha yüksek korelasyon katsayısıyla tahmini yapılabilir.

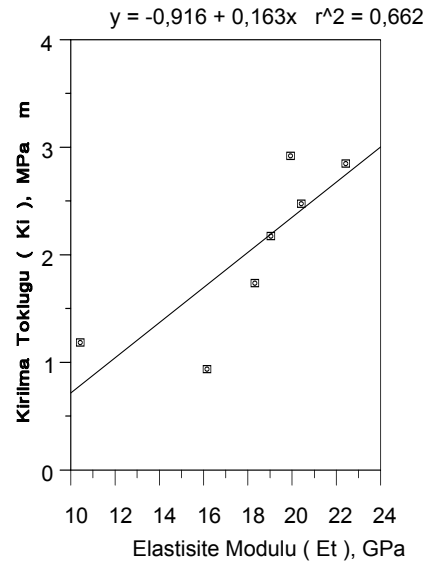
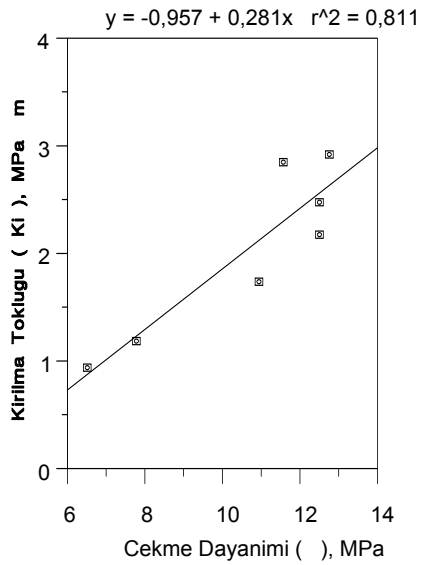
Kayacın kırılma tokluğu ile diğer mekanik özellikleri arasındaki istatistiksel anlamlılık açısından ilişkileri sırasıyla; tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, koni delici değeri ve nokta yük dayanım değerleri şeklinde görülmüştür.



(a)

(b)

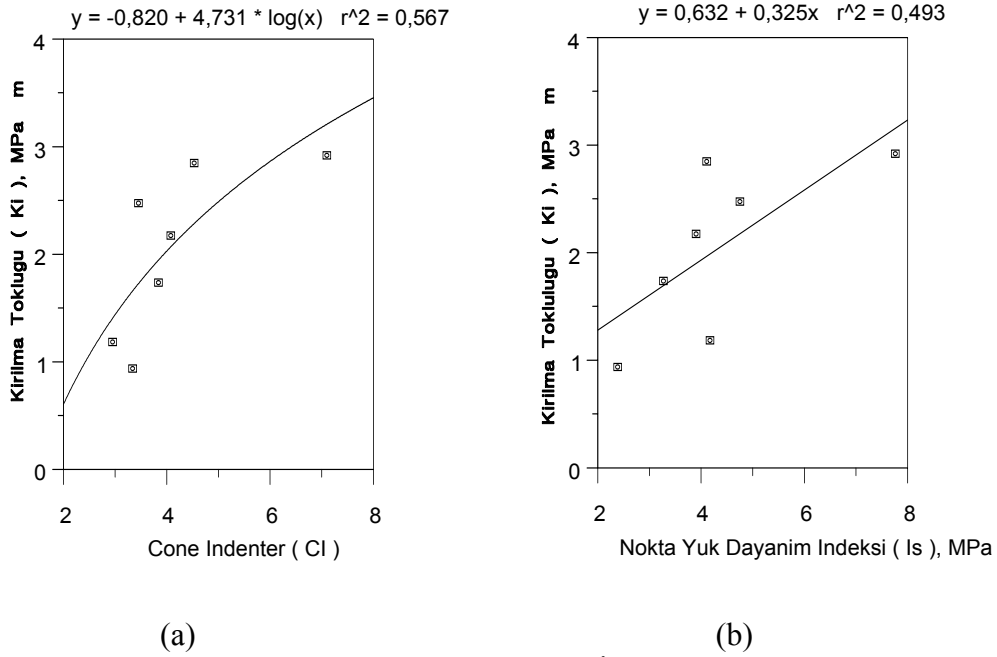
Şekil 3: (a)Gevreklik ve, (b)Tek Eksenli Basınc Dayanımı ile Kırılma Tokluğu arasındaki ilişki



(a)

(b)

Şekil 4: (a)Çekme Dayanımı ve, (b)Elastisite Modülü ile Kırılma Tokluğu arasındaki ilişki



Şekil 5: (a)Koni Delici Değeri ve, (b)Nokta Yük Dayanım İndeksi ile Kırılma Tokluğu arasındaki ilişki

Çizelge 3: Çoklu regresyon analiz sonuçları

İlişki No	İlişki Denklemi	Korelasyon Katsayısı (r)
1	$K_1 = - 0,533 + 0,0232 \sigma_C + 0,0767 \sigma_T$	0,971
2	$K_1 = - 0,196 + 0,0349 \sigma_C - 0,0946 I_S$	0,972
3	$K_1 = - 0,117 + 0,356 \sigma_C - 0,129 CI$	0,973
4	$K_1 = - 0,959 + 0,234 \sigma_T + 0,117 I_S$	0,923
5	$K_1 = - 1,09 + 0,231 \sigma_T + 0,162 CI$	0,931
6	$K_1 = - 0,133 + 0,0368 \sigma_C - 0,054 I_S - 0,092 CI$	0,975
7	$K_1 = - 1,07 + 0,227 \sigma_T + 0,030 I_S + 0,134 CI$	0,932

Dolayısıyla, kayaçların tek eksenli basınç dayanımları dikkate alınarak incelenen kayaçların kırılma tokluğu değerleri hakkında bir ön fikir vermesi açısından önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmalarım esnasında öneri ve eleştirileriyle bana yön veren hocam sayın Prof. Dr. R. Mete GÖKTAN'a teşekkür ederim

SEMBOLLER LİSTESİ

- σ_C : Tek eksenli basınç dayanımı, (MPa)
 σ_T : Brazilian çekme dayanımı, (MPa)
 I_S : Nokta yük dayanım indeksi, (MPa)
 E_t : Elastisite modülü, (GPa)
 CI : Koni delici değeri
 K_1 : Kırılma tokluğu, (MPa \sqrt{m})
 δ : Yoğunluk (gr/cm³)
 rg : Gevreklik
 H : Yükleme plakaları arasındaki mesafe (numune yüksekliği), (mm)
 D : Karot (numune) çapı, (mm)
 P : Kırılma yükü, (MN)
 B : Disk kalınlığı, (mm)
 T : Yükleme düzeyinin düzlem uzunluğu, (mm)
 a : Çentik (yarık) derinliği, (mm)
 β : $\sin^{-1} (T/D)$, (radyan olarak)

KAYNAKLAR

- Altındağ R., (1997): “Kayaç gevreklik ölçütlerinin kazı mekaniği amaçları için kullanılabilirlik analizleri”, Doktora Tezi, O.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
 Bearman R.A., Barley R.W., (1991): “Prediction of power consumption and product size in cone crushing”, Min.Engng,4,pp.1243-1256.
 Bearman R.A., Pine R.J., Wills B.A., (1989): “Use of fracture toughness testing in characterising the comminution potential of rock”, Proc.MMIJ/IMM Joint Symp., Kyoto, pp.161-180.
 Brook N., (1993): “The measurement and estimation of basic rock strength”, Comprehensive Rock Engineering (Edited by Hudson J A.), V3,pp 41-66.
 Gunsallus K.L., Kulhawy F.H., (1984): “A comparative evaluation of rock strength measures”, Int.J.Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 21, pp.233-248.
 Huang S., Liu E., Sun J., Jian Z., (1987): “The application of fracture mechanics to fracture analysis of concrete dam”, Proc.SEM/RILEM Int.Cong. on Fracture of Concrete and Rock, Houton, TX,pp.520-527.
 Huang J., Sijing W., (1985): “An experimental investigation concerning the comprehensive fracture toughness of some brittle rocks”, Int.J.Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22, pp.99-104.
 Hucka V., Das B., (1974): “Brittleness determination of rocks by different methods”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 11, pp.389-392.
 ISRM (1988): “Suggested methods for determining the fracture toughness of rocks (F.Ouchterlony, working Group Coordinator)”, Int.J.Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 25, pp.71-96.
 ISRM (1985): “Suggested methods for determining point load strength”, Int.J.Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22, pp.53-60.
 Lajtai E.Z., Bielus L.P., (1986): “Stress corrosion cracking of Lac du Bonnet granite in tension and compression”, Rock Mech. Rock Engng, 19,pp.71-87.

- Nelson P.P., Fong F.L.C., (1986): "Characterization of rock for boreability using fracture material properties", Proc.27 th U.S. Symp.Rock Mechanics, pp,846-852.,SME,Littleton,CO.
- Pathan A.C., (1987): "A study of fracture toughness in relation to mine design", PhD Thesis, Dept. Of Mining Eng. University of Nottingham, England.
- Singh R.N., Pathan A.G., (1988): "Fracture toughness of some british rocks by diametral loading of discs", Mining Scie. and Techn.,6,pp.179-190.
- Szendi-Howarth G., (1982): "On the fracture toughness of coal", Australian J. Coal Mining Technology Res., 2,pp.51-57.
- TS 699 (1987): "Tabii yapı taşları-muayene ve deney metodları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 7654 (1989): "Kayaçların çekme mukavemetinin indirekt metotla tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 2030 (1975): "Kayaçların elastisite modülünün ve poisson oranının tek eksenli basma dayanımı ile tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Whittaker B.N., Singh R.N., Sun G., (1992): "Rock Fracture Mechanics - Principles, Design and Applications", p.570, Elsevier, Amsterdam.