



Orijinal Araştırma / Original Research

S_{20} KIRILGANLIK İNDEKSİNİN KAYAÇLARIN PARÇALANABİLİRLİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF S_{20} BRITTLENESS INDEX IN TERMS OF THE CRUSHABILITY OF ROCKS

Ekin Köken^{a,*}, Hamit Aydın^{a,**}, Ahmet Özarslan^{a,***}

^a Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak / TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 22 Mayıs / May 2018

Kabul Tarihi / Accepted : 27 Ağustos / August 2018

Anahtar Sözcükler:

Parçalanabilirlik,
Agrega,
Kırılgenlik,
Agrega darbe değeri,
 S_{20} kırılgenlik indeksi

ÖZ

Kayaçların kırılgenliğinin belirlenmesi, farklı madencilik uygulamalarında önemli bir ön tasarım aracı olarak kabul edilmektedir. Kayaçların dayanım - kırılgenlik ilişkisi, kayaçların delinebilirliği, kazılabilirliği ve parçalanabilirliği açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada kayaçların kırılgenlik derecesinin belirlenmesinde çoğunlukla kullanılan S_{20} kırılgenlik indeksi deneyi, kayaçların parçalanabilirliği açısından incelenmiştir. Önceki çalışmalarda kullanılan kırılgenlik indeksleri özetlenmiş ve bu yaklaşımların S_{20} kırılgenlik indeksi ile olan ilişkisi araştırılmıştır. On iki farklı kaya türünde gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları sonucunda, B_3 kırılgenlik indeksi ve saha çalışmaları pratik ve tekrarlanabilirliği yüksek bir deney olan agrega darbe değeri testi (AIV) ile S_{20} arasında anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Sonuç olarak kaya malzemesinin parçalanabilirliğinin niceliksel olarak tanımlanmasını amaçlayan bir sınıflama sistemi önerilmiştir. Önerilen sınıflama sisteminin kırma – eleme tesislerine uygun çeneli kırıcı seçiminde, agregaların aşınma ve parçalanma özelliklerinin ve iyi kalite kaya kütlelerinde gerçekleştirilen delme ve patlatma uygulamalarında özgül şarjın kestiriminde kullanılabilir.

ABSTRACT

The determination of rock brittleness is acknowledged as an important pre-design tool in different mining applications. The relationship between strength - brittleness is quite important in terms of the drillability, excavability and crushability of rocks. In this study, S_{20} brittleness index test mainly used to determine the degree of rock brittleness is investigated in terms of the crushability of rocks. The brittleness indexes used in previous studies are summarized and the relationship between these approximations and S_{20} brittleness index are investigated. As a result of laboratory studies performed on twelve different rock types, remarkable relations are obtained between B_3 , S_{20} brittleness index and aggregate impact value test (AIV) which are practical and highly repeatable in field studies. In consequence, a classification system is proposed quantitatively aiming to identify the crushability of rock material. The proposed classification may be used to choose jaw crusher proper to crushing – screening plant, predict abrasion and fragmentation properties of aggregates and powder factor in drilling and blasting applications executed in rock masses with good quality.

Keywords:

Crushability,
Aggregate,
Brittleness,
Aggregate impact value,
 S_{20} Brittleness index

* Sorumlu yazar: ekin.koken@beun.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-0178-329X>

** haydin@beun.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-2165-5869>

*** ozarslan@beun.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-8763-6420>

Bu bildiri 2017 yılında düzenlenen 6. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi Bildiriler Kitabı'nda yayınlanmıştır. /

This paper was published in the 6th International Mining Machinery and Technologies Congress of Turkey held in 2017.

Bu makalenin tüm yayın hakları TMMOB Maden Mühendisleri Odası'na aittir © 2018 / Copyright © 2018 Published by UCTEA

Chamber of Mining Engineers of Turkey. All rights reserved.

GİRİŞ

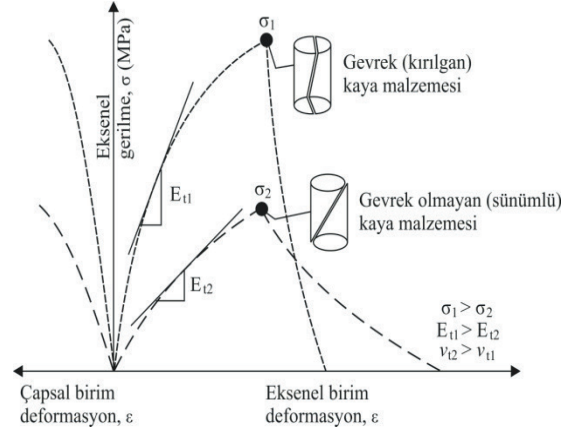
Kayaçların kırılma derecesinin belirlenmesi, kayaçların delinebilirliği, aşındırıcılığı ve yükler altındaki davranışının kestiriminde önemli bir büyüklük olarak kabul edilmektedir. Kayaçların en uygun seviyede enerji tüketimi ve buna karşılık gelen maliyeti ile çalışma sahasındaki iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin alınarak kazılması, madencilik verimliliği, sürdürülebilirliği ve ekolojik dengenin gözetilmesi açısından oldukça önemlidir. Kayaçların kırılma derecesini en temel olarak litolojik farklılık, tane boyu, mineralojik ve petrografik özellikler, ayrışma – bozunma ve kayaçların bulunduğu ortamın yapısal ve hidrojeolojik özellikleri kontrol etmektedir.

Madencilik alanında özellikle kazı mekaniği (aşındırıcılık, kesilebilirlik ve delinebilirlik konularında), delme-patlatma ve derin yeraltı açıklıklarında gözlenen kaya patlaması probleminin önlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda, kayaçların dayanıklılığı ve kırılma derecesini aşağıda listelenen olgular ile ilişkilendirilmektedir (Schwartz 1964; Howarth ve Rowlands 1987; Wawersik ve Fairhurst 1970; Pang ve Goldsmith 1990; Göktan 1991; Bruland 1998; Kahraman 2002; Altındağ 2002; Çopur vd. 2003; Cai vd. 2004; Günaydın vd. 2004; Yağız 2009; Yaralı ve Kahraman 2011; Guo vd. 2012; Tarasov ve Potvin 2013; Nejati ve Ghazvinian 2014; Yaşar vd. 2014; Meng vd. 2015; Özfırat vd. 2016; Xia vd. 2017).

- Kaya malzemesi ve kütlesinin jeo-mekanik özelliklerinin belirlenmesi.
- Kayaçlardaki gerilme birim – deformasyon ilişkisinin ortaya konması.
- Kaya malzemesindeki çatlak başlangıcının belirlenmesi.
- İnceleme alanına ait yapısal ve hidrojeolojik özelliklerin ortaya konması
- Arazi gerilmesinin doğrultu ve büyüklüğünün belirlenmesi.

Taş ocaklarında kullanılan çeneli kırıcıların seçiminde, tam cepheli tünel açma makineleri ile açılan tünellerde keski ömrünün kestirimi ve delme oranı hakkında yapılan çalışmalarda da kayaçların dayanımı ile kırılma derecesini arasında anlamlı ilişkiler olduğu bilinmektedir (Weiss 1985; Singh 1986; Wills 1992; Duthoit 2000; Thuro ve Spaun 1996; Thuro vd. 2007).

Kayaçların aşındırıcılığının önemli olduğu keski tüketimi hakkında yapılan çalışmalarda mineralojik ve petrografik analizler önemli bir yer tutarken, kayaçların kırılma derecesini pratik olarak kendi mekanik özellikleri ile temsil edilmektedir. Kırılma derecesi esasında kayaçların yükler altındaki davranışının niceliksel bir ifadesi olarak tanımlanabilir. Kırılma (gevrek) bir kaya malzemesi ile sünümlü (gevrek olmayan) bir kaya malzemesinin eksenel yüklem altındaki davranışı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Gevrek ve gevrek olmayan kaya malzemelerinin tipik gerilme – birim deformasyon eğrisi (σ_1, σ_2 : Tek eksenli basınç dayanımı, E_{11}, E_{12} : Teğetsel Young Modülü, ν_{11}, ν_{12} : Teğetsel Poisson Oranı).

Herhangi bir ayrışma - bozunma içermeyen ve kuru koşullar altındaki gevrek kaya malzemeleri genellikle sünümlü davranış gösteren kaya malzemelerine göre daha dik açılar ile kırılmaktadır (Şekil 1). Bu tip kayaçlara ait tek eksenli basınç dayanımı ve Teğetsel Young Modülü değerleri, sünümlü kayaçlardan daha yüksek olurken ($\sigma_1 > \sigma_2$ ve $E_{11} > E_{12}$), Teğetsel Poisson Oranı değerleri ise sünümlü kayaçlardan daha düşüktür ($\nu_{12} > \nu_{11}$). Ancak farklı kayaçlar benzer eksenel deformasyon değerlerinde kırılabileceği gibi, benzer Young Modülü değerlerine de sahip olabilir. Bu açıdan kayaçların kırılma derecesinin farklı yöntemler ile ele alınmasında yarar vardır.

Bu çalışmada on iki farklı kaya türü üzerinde çeşitli kaya mekaniği ve agrega deneyleri gerçekleştirilmiş ve kayaçların kırılma derecesini farklı yaklaşımlar ışığında değerlendirilmiş, ayrıca saha çalışmalarında pratik olarak kullanılabilen agrega darbe dayanım deneyi ile S_{20} deneyi arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır.

1. MATERYAL VE METOT

Kayaçların kırılma derecesinin niceliksel olarak belirlenmesi amacıyla yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda kayaçların kırılma derecesinin kestiriminde aşağıda ifade edilen üç ana değişikliğe göz önünde bulundurulmuştur.

- Dayanım indeks yöntemleri: Özellikle tek eksenli basınç dayanımı, (σ_{ci} (MPa)) ve dolaylı çekme dayanımı ($\sigma_{t\beta}$ (MPa)) kullanılmaktadır.
- Grafik çözüm yöntemleri: Kaya malzemesine ait gerilme – birim deformasyon eğrisi dikkate alınmaktadır.
- Mekanik parçalama yöntemleri: Kayaçların farklı deney yöntemleri ile kırılmasıyla ince tane oranının belirlenmesi esasına dayanmaktadır.

Bu çalışmada sözü edilen üç farklı alt grup altında değerlendirilen değişimler S_{20} kırılma indeks değeri ile karşılaştırılmış ve kaya malzemesinin parçalanabilirliğinin arazide pratik olarak belirlenmesi amacıyla bir sınıflama sistemi geliştirilmiştir.

1.1. Kırılma İndeksleri

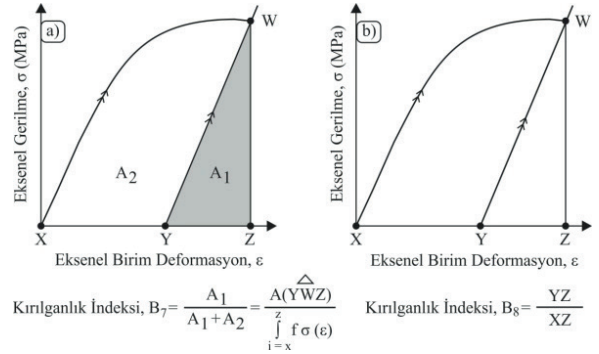
Dayanım indeks yöntemleri, kaya malzemesinin mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi esas alan niceliksel bir büyüklüğü ifade etmektedir. Çoğunlukla σ_{ci} ve $\sigma_{t\beta}$ gibi mekanik özelliklerin dikkate alındığı dayanım indeks yöntemlerinden bazıları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Dayanım indeks yöntemleri.

Kırılma İndeksi	Görgül Bağıntı	Araştırmacı
B ₁	$\frac{\sigma_{ci}}{ \sigma_{t\beta} }$	Hucka ve Das (1974)
B ₂	$\frac{\sigma_{ci} - \sigma_{t\beta} }{\sigma_{ci} + \sigma_{t\beta} }$	Hucka ve Das (1974)
B ₃	$\frac{\sigma_{ci} \times \sigma_{t\beta} }{2}$	Altındağ (2002)
B ₄	$2,57 \times \sqrt{\sigma_{ci}}$	Yağız ve Gökçeoğlu (2010)
B ₅	$E_n \times \rho_d$	Sharma ve Chopra (2012)
B ₆	$\frac{E_n^{0,51} \times \sigma_{t\beta} ^{0,84}}{\sigma_{ci}^{0,21}}$	Nejati ve Moosavi (2017)

Grafik çözüm yöntemleri, kaya malzemesinin eksenel yüklemeye altındaki davranışını (gerilme – birim deformasyon ilişkisini) esas almaktadır.

Kaya malzemesine ait gerilme – birim deformasyon eğrisi kullanılarak belirlenen deformasyon enerjisinin (Şekil 2a) ve kaya malzemesinin kırıldığı andaki noktanın (W noktası), Teğetsel Young Modülü’nün belirlendiği doğrusallığa çizilen paralelin eksenel birim deformasyon eksenini kestiği noktadaki değeri (YZ mesafesi) belirlenerek kayaçların kırılma indeks değeri belirlenmektedir (Şekil 2b).

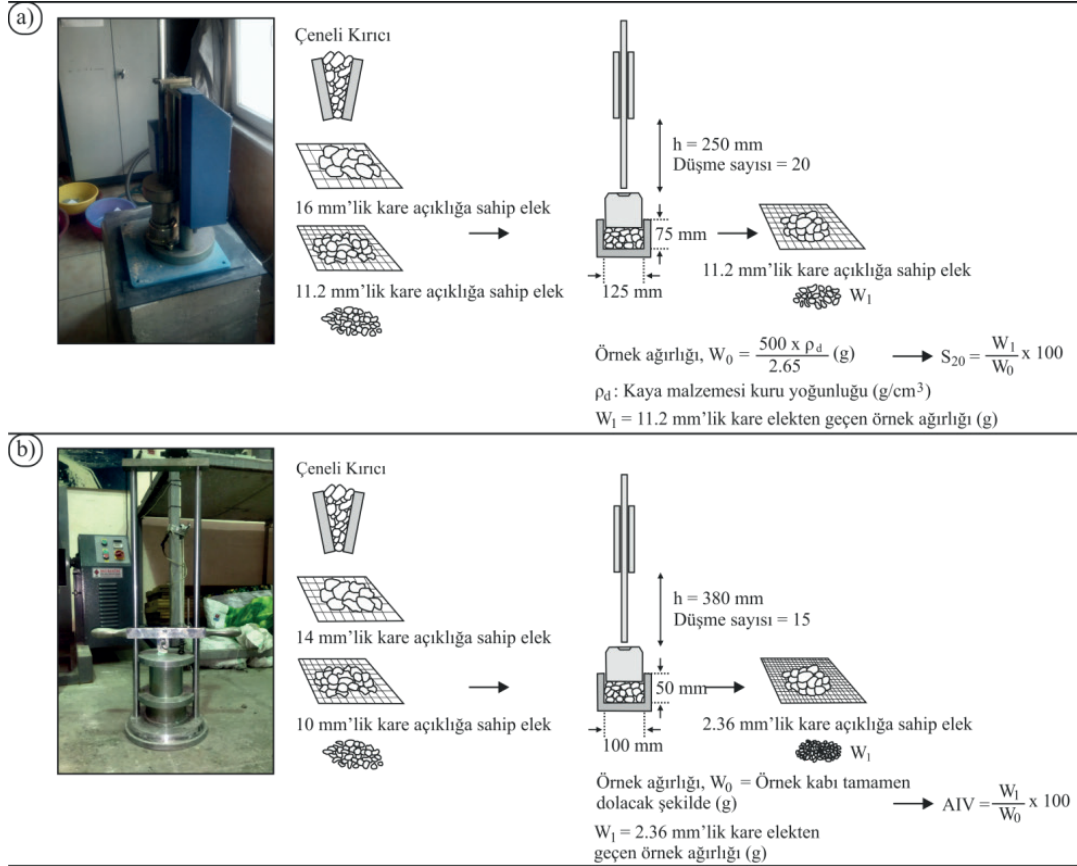


Şekil 2. Grafik çözüm yöntemleri a) Alanal yöntem b) Çizgisel yöntem (Hucka ve Das 1974’den düzenlenerek).

Gerilme – birim deformasyon eğrisinin esas alındığı grafik çözüm yöntemleri, Meng vd. (2015) tarafından ayrıntılı olarak incelenmiş olup, yenilme sonrası (post failure) gerilme – birim deformasyon eğrisinin dikliği dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Hesaplama yöntemlerinin zaman alması ve gelişmiş katı yüklemeye makinelerine duyulan ihtiyaç sebebiyle grafik çözüm yöntemlerinin kayaçların kırılma derecesinin kestiriminde kullanılabilirliği sınırlıdır.

Mekanik parçalama yöntemleri kullanılarak belirlenen kırılma indeks değeri ise agrega deneylerine benzer bir yaklaşım ile ele alınmaktadır.

Bu deneylerden önemli bir tanesi Prodotyakonov (1962) tarafından önerilen ve genellikle kömürler için kullanılan darbe dayanım indeksi (Impact strength Index, ISI) deneyidir. Bu çalışmada mekanik parçalanma yöntemleri olarak S_{20} kırılma indeks deneyi ile agrega darbe dayanım deneylerine yer verilmiştir. S_{20} kırılma indeks deneyi ve agrega darbe dayanım indeksi deneyine ilişkin genel bilgiler Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Bu çalışmada kullanılan mekanik parçalama yöntemleri a) S20 kırılganlık testi b) Agrega darbe dayanım (AIV) testi

Bu çalışmada kırılganlık derecesinin belirlenmesinde esas olarak S_{20} kırılganlık deney sonuçları göz önünde bulundurulmuş olup, S_{20} deney sonuçlarına göre kayaçların kırılganlık açısından sınıflandırılması Dahl vd. (2012)'ye göre Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. S_{20} Kırılganlık indeksi sınıflaması (Dahl vd. (2012)).

S_{20} (%)	Kırılganlık
≥ 66	Oldukça Yüksek
65,9 – 60	Çok Yüksek
59,9 – 51,0	Yüksek
50,9 – 41	Orta
40,9 – 35	Düşük
34,9 – 29,1	Çok Düşük
≤ 29	Oldukça Düşük

1.2. İncelenen Kayaçların Jeolojik ve Petrografik Özellikleri

Bu çalışma kapsamında on iki adet kayaç kırılganlık açısından incelenmiştir. İncelenen kayaçlar litolojik olarak; granodiyorit, diyorit, andezit, bazalt, gabro, gnays, kumtaşı, kireçtaşı, siltaşı, marn ve tuf olarak tanımlanmıştır. Laboratuvar çalışmalarında ISRM (2007) tarafından ayrışmamış kayaç (W_0) olarak tanımlanan kayaçlar kullanılmış olup, böylece ayrışma – bozunmanın kırılganlık üzerine olan etkileri en aza indirgenmiştir. Bu çalışmada incelenen kayaçlara ait genel jeolojik ve petrografik özellikler ise aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Granodiyorit ve diyorit bileşimli kayaçlar, genellikle koyu gri ve gri tonlarda gözlenmekte olup, genellikle kuvars, plajiyoklas, biyotit, piroksen, hornblend ve opak minerallerden oluşmaktadır. Kayaçların tane boyutu çoğunlukla 0.5 mm ile 2.2 mm arasında değişmektedir. Kayaçlar genellikle faneritik dokudadır.

- Andezit bileşimli kayalar, genellikle gri, pembe ve sarı tonlarda gözlenmekte olup, çoğunlukla porfirik ve hiyalopilitik bir dokuya sahiptir. Andezitler çoğunlukla Na'ca zengin plajiyoklas (Albit), hornblend ve biyotit minerallerinden oluşmaktadır. Hamur fazı içerisindeki fenokristallerin boyutları 0.2 mm ile 1 mm arasındadır.
- Bazalt ve gabro olarak tanımlanan kayalar içerisinde, bazaltlar ince taneli (tane boyutu 0.01 – 0.5 mm arasında) ve gabro bileşimindeki kayalar ise orta ve iri taneli (tane boyutu 0.08 – 1.5 mm arasında) olarak tanımlanmaktadır. Bazaltik kayalar genelde koyu gri ve koyu yeşil tonlarında gözlenmektedir. Ayrıca bazalt olarak tanımlanan kayalar genelde hiyalopilitik dokuda olup, gabrolar ise poikilitik dokudadır.
- İncelenen kayaç gruplarındaki tek metamorfik kayaç olan gnays iri taneli olup, tane boyutu 0.4 mm ile 2.4 mm arasında değişmektedir. Gnayslar foliasyonlu bir yapıya sahip olup, bantlı yapı içerisindeki iri plajiyoklaslarda kısmen yönlendirilmiştir.
- İncelenen kumtaşları koyu gri tonlarda gözlenmekte olup, ince taneli bir yapıya sahiptir. Kumtaşlarındaki tanelerin boyutu 0.05 mm ile 0.1 mm arasında değişmektedir. Ayrıca kumtaşları laminalı bir yapıya sahiptir.
- Kireçtaşları koyu gri tonlarda olup, mikritik özelliktedir. Mikritik karbonat tanelerin boyutu 0.003 mm ile 0.02 mm arasında değişmektedir. Ayrıca kireçtaşları gelişigüzel kalsit damarları içermektedir.
- İncelenen karbonatlı kireçtaşı olarak tanımlanan marnların tane boyutu 0.02 mm ile 0.06 mm arasındadır. Kayalar yumuşak ve gevşek dokusu ile dikkat çekmektedir. Marnlar tırnakla çizilmekte olup, numune hazırlama esnasında bu kayaların sudan oldukça fazla etkilendiği gözlenmiştir.
- Tüfler genelde kahverengi tonlarda olup, tane boyutu 0.05 mm ile 0.1 mm arasındadır. Boşluklu bir yapıya sahip olan tüfler, yoğunluk farkı ile beraber bulunduğu ignimbrit türü kayalardan ayrılmaktadır.

2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

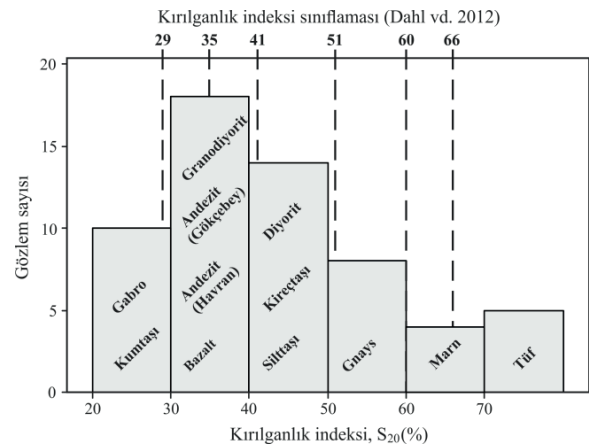
Laboratuvar çalışmaları kapsamında, kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayırı-

ca kayaların kırılma derecesinin belirlenmesi için S_{20} kırılma indeks deneyi ile agrega darbe dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. S_{20} kırılma indeks deneyi, Norveç Teknoloji Enstitüsü (NTNU) ve SINTEF ortaklığı tarafından 1960 yılından beri uygulanan bir deney yöntemidir.

Bu deney yöntemi hakkındaki genel bilgiler Dahl (2003) tarafından ayrıntılı şekilde ifade edilmiş ve Şekil 3'te özetlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan agrega darbe dayanım deneyi ise BS 812 -112 (1990) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. ve laboratuvar deney sonuçları toplu olarak Çizelge 3'te verilmiştir.

İncelenen kayaların kırılma dereceleri Dahl vd. (2012) tarafından önerilen S_{20} kırılma indeksine göre (Bkz. Çizelge 2) değerlendirilmiştir. Çizelge 2'ye göre, gabro ve kumtaşı türündeki kayalar çoğunlukla "Oldukça Düşük" kırılma derecesinde, granodiyorit, andezit ve bazalt türündeki kayalar "Çok Düşük" ve "Düşük" kırılma derecesindedir. Diyorit, kireçtaşı ve siltaşı türündeki kayalar çoğunlukla "Orta" kırılma derecesinde olup, gnays kayacı ise "Yüksek" kırılma derecesindedir. Marn kayacı "Çok Yüksek" ve "Oldukça Yüksek" kırılma derecesine sahiptir (Şekil 4).



Şekil 4. İncelenen kayaların litolojilerine göre S_{20} kırılma indekslerindeki değişimi.

İncelenen kayaların kırılma dereceleri, S_{20} kırılma indeksine göre belirlenmiş ve S_{20} ile bu çalışmada kullanılan dayanım indeks yöntemleri

(Bkz. Çizelge 1), grafik çözüm yöntemleri (Bkz. Şekil 2) ve agrega darbe dayanımı (Bkz. Şekil 3) arasındaki ilişkiler araştırılmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 4'e göre S_{20} ile dayanım indeks yöntem-

Çizelge 3. İncelenen kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri.

Kayaç Türü	Lokasyon	γ_d (kN/m ³)	n (%)	σ_{IB} (MPa)	σ_{ci} (MPa)	E_{ii} (GPa)	AIV (%)	S_{20} (%)
Granodiyorit	Havran /	27,23 ± 0,83	0,66 ± 0,16	6,57 ± 0,60	154,34 ± 11,05	71,98 ± 3,02	14,67 ± 1,37	33,26 ± 2,80
	Balıkesir	(24)	(24)	(10)	(5)	(7)	(10)	(6)
Andezit	Havran /	23,92 ± 0,34	1,98 ± 0,22	5,91 ± 0,46	84,54 ± 5,27	22,00 ± 1,85	22,30 ± 3,22	37,70 ± 2,34
	Balıkesir	(18)	(18)	(10)	(8)	(7)	(7)	(7)
Kireçtaşı	Havran /	25,43 ± 0,13	0,39 ± 0,06	7,56 ± 0,74	82,32 ± 7,51	33,85 ± 3,93	17,13 ± 2,46	49,00 ± 3,13
	Balıkesir	(10)	(10)	(10)	(5)	(5)	(8)	(6)
Bazalt	Ilıca /	26,86 ± 0,23	0,88 ± 0,21	15,47 ± 1,57	143,66 ± 15,26	50,32 ± 3,35	11,50 ± 0,60	40,70 ± 2,91
	Kütahya	(26)	(26)	(8)	(10)	(5)	(8)	(5)
Kumtaşı	Üzülmöz /	25,56 ± 0,17	2,67 ± 0,70	11,20 ± 1,72	144,47 ± 23,33	31,27 ± 4,84	15,58 ± 1,44	29,77 ± 3,00
	Zonguldak	(30)	(30)	(12)	(12)	(6)	(8)	(7)
Silttaşı	Üzülmöz /	25,50 ± 0,35	5,28 ± 1,66	7,00 ± 2,05	48,14 ± 17,83	15,42 ± 2,03	26,13 ± 2,18	37,03 ± 2,66
	Zonguldak	(29)	(29)	(10)	(15)	(5)	(8)	(6)
Marn	Dursunbey /	20,58 ± 0,18	10,38 ± 2,18	2,06 ± 0,50	29,14 ± 4,00	3,56 ± 0,95	39,24 ± 2,50	67,68 ± 3,12
	Balıkesir	(8)	(8)	(5)	(5)	(4)	(5)	(4)
Gnays	Güney /	25,92 ± 0,22	0,66 ± 0,10	7,55 ± 0,86	80,96 ± 14,61	36,00 ± 3,85	31,21 ± 3,28	54,83 ± 2,60
	Denizli	(9)	(9)	(5)	(5)	(5)	(7)	(7)
Gabro	Yenice /	28,24 ± 0,38	0,17 ± 0,03	20,25 ± 1,51	188,29 ± 21,18	70,98 ± 7,86	9,02 ± 1,21	25,41 ± 1,65
	Karabük	(16)	(16)	(11)	(7)	(5)	(10)	(7)
Andezit	Gökçebe /	23,14 ± 0,16	5,45 ± 0,53	6,38 ± 0,94	106,56 ± 6,02	25,21 ± 2,84	17,35 ± 1,53	39,66 ± 2,14
	Zonguldak	(8)	(8)	(5)	(5)	(4)	(7)	(6)
Diyorit	Gökçebe /	27,66 ± 0,15	1,07 ± 0,12	6,35 ± 0,77	113,07 ± 8,70	33,41 ± 3,70	16,40 ± 1,31	47,21 ± 2,42
	Zonguldak	(10)	(10)	(10)	(8)	(4)	(8)	(7)
Tüf	Develi /	21,31 ± 0,40	11,26 ± 2,09	2,92 ± 0,36	19,75 ± 3,56	3,30 ± 0,66	43,87 ± 2,68	72,52 ± 2,98
	Kayseri	(10)	(10)	(7)	(7)	(5)	(8)	(5)

Açıklamalar: Ortalama ± standart sapma (Örnek sayısı), γ_d : Kuru birim hacim ağırlık, n: Görünür gözeneklilik, σ_{IB} : Dolaylı çekme dayanımı, σ_{ci} : Tek eksenli basınç dayanımı, E_{ii} : Teğetsel Young Modülü, AIV: Agrega darbe indeks değeri, S_{20} : Kırılma indeksi

Çizelge 4. Bu çalışmada kullanılan farklı kırılma indeksleri ile S_{20} kırılma indeksi arasındaki ilişki katsayıları.

Kırılma İndeksi	Bağımsız Değişkene Ait Görgül Bağlantı	R ²	Araştırmacı
B ₁	$\frac{\sigma_{ci}}{ \sigma_{t\beta} }$	0.06	Hucka ve Das (1974)
B ₂	$\frac{\sigma_{ci} - \sigma_{t\beta} }{\sigma_{ci} + \sigma_{t\beta} }$	0.09	Hucka ve Das (1974)
B ₃	$\frac{\sigma_{ci} \times \sigma_{t\beta} }{2}$	0.81	Altındağ (2002)
B ₄	$2,57 \times \sqrt{\sigma_{ci}}$	0.78	Yağız ve Gökçeoğlu (2010)
B ₅	$E_{ii} \times \rho_d$	0.65	Sharma ve Chopra (2012)
B ₆	$\frac{E_{ii}^{0,51} \times \sigma_{t\beta} ^{0,84}}{\sigma_{ci}^{0,21}}$	0.69	Nejati ve Moosavi (2017)
B ₇	Alansal grafik çözüm yöntemi*	0.35	Hucka ve Das (1974)
B ₈	Çizgisel grafik çözüm yöntemi*	0.23	Hucka ve Das (1974)

Not: σ_{ci} = MPa, σ_{IB} = MPa E_{ii} = GPa ρ_d = g/cm³ birimindedir. * Şekil 2'de ifade edilen grafik çözüm yöntemleri.

leri arasındaki en anlamlı ilişki, Altındağ (2002) tarafından önerilen B_3 kırılma indeksi arasında olurken, grafik çözüm yöntemlerinden elde edilen kırılma indeksleri (B_7 , B_8) ile anlamlı ilişkiler elde edilememiştir. Ayrıca S_{20} ile AIV arasında da

anlamlı bir ilişki belirlenmiştir.

Önceki çalışmalardan elde edilen bulgular ve Çizelge 3'te ifade edilen verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar, kayaçların mekanik dayanım değişirgeleri ile kırılma indeksi arasında doğrudan bir ilişki olduğunu desteklemektedir.

Benzer şekilde S_{20} ve AIV deney düzenekleri arasındaki benzerlikler, deneyler için hazırlanan numune boyutlarının nispeten birbirine yakın olması ve bu iki deney yönteminde esas alınan parçalanma mekanizması (belirli ağırlıktaki bir çekicinin tekrar eden serbest düşme ile deney numunesini parçalaması), sözü edilen iki değişirge arasında anlamlı bir ilişki bulunmasına olanak sağlamaktadır.

Çizelge 3'teki verilerin analizi sonucunda elde edilen başka bir bulgu ise, farklı litolojik ve dayanım özelliklerine sahip kayaçların benzer kırılma derecelerine sahip olmasıdır.

Bu çalışmada ayrılmamış kayaçların kullanıldığı

gözetildiğinde, tane boyutu ile kırılabilirlik arasında istatistiksel bir ilişki belirlenememiş ancak dayanım sınıf aralıkları ile kırılabilirlik arasında bir geçiş bölgesinin olduğu belirlenmiştir.

Deere ve Miller (1966)'a göre $\sigma_{ci} > 100$ MPa değerine sahip kayalar "Yüksek Dayanımlı Kayaç" sınıfında yer almaktadır. Bu dayanım aralığının S_{20} kırılabilirlik indeksi sınıflamasındaki yerinin belirlenmesinin, kayaların kırılabilirliği konusunda genel bir kanı ve uygulamalarda bir pratiklik oluşturulması hususunda önemli olduğu yazarlar tarafından düşünülmektedir.

Dahl vd. (2012)'e göre düşük ve orta derecede kırılabilirliğe sahip kayaların S_{20} değer aralığı %35 ile %51 arasındadır. Bu değer aralığı dışına çıktığında kayaların σ_{ci} değerinde belirgin bir farklılık gözlenmektedir. Şekil 5 bu açıdan incelendiğinde, $\sigma_{ci} < 100$ MPa değerine sahip kayaların yüksek derecede kırılabilir olduğu, $\sigma_{ci} \geq 100$ MPa değerine sahip kayaların ise düşük derecede kırılabilir olduğu görülmektedir. Tek eksenli basınç dayanımı değerinin 100 MPa civarında olduğu kaya türlerinde ise kayaların kırılabilirliği düşük ve orta derecededir. Bu kritik değerin ($\sigma_{ci} \approx 100$ MPa) aslında bu çalışmada incelenen kayaların kırılabilirliği konusunda bir geçiş bölgesi (düşük kırılabilirlikten yüksek kırılabilirliğe doğru) olduğu söylenebilir.

3. TARTIŞMA

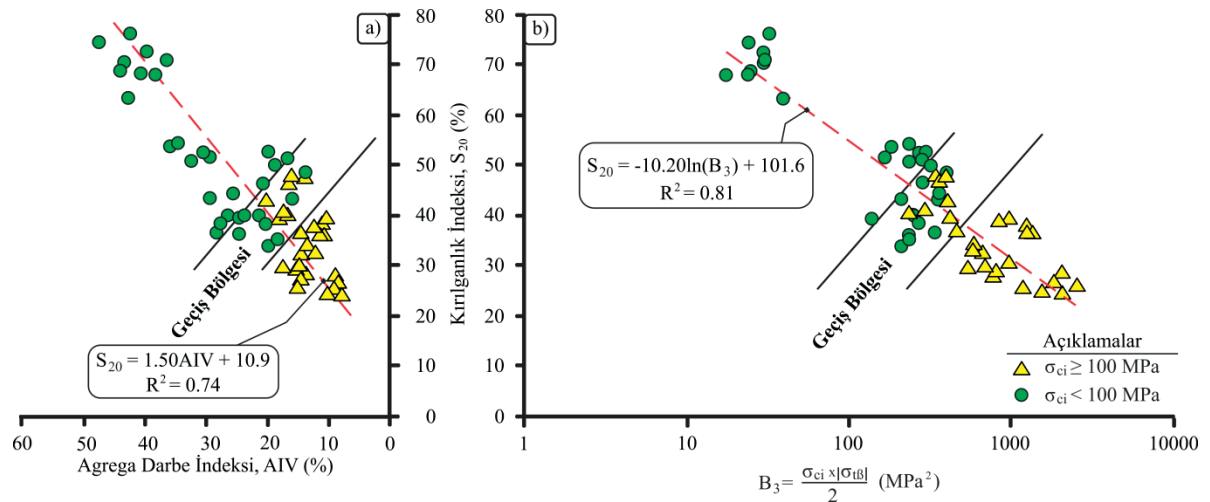
Kayaların yükler altındaki davranışının ortaya konması, gerek yerüstü gerekse yeraltı madencilik uygulamalarında oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir. Dayanım – kırılabilirlik ilişkisi kaya malzemesi boyutunda nispeten açıklanabilmektedir. Ancak bu ilişkinin kaya kütlesi boyutundaki anlaşılabilirliği, pratik uygulamalarda halen karmaşıklığını korumakta ve bu kapsamda çalışmalar devam etmektedir.

Kayaların kırılabilirliğinin tanımlanması ve yorumlanması farklı açılardan değerlendirilebilir. Bu çalışmada S_{20} kırılabilirlik indeksi, kayaların kırılabilirliğinin parçalanabilirlik açısından bir ifadesi olarak yorumlanmaktadır.

Ancak kırılabilirlik bir malzeme davranışı olarak düşünüldüğünde, gevrek malzemelerin daha kırılabilir, sünek malzemelerin ise daha az kırılabilir olduğunu söylemek mümkündür. Meng vd. (2015), önceki çalışmalarda ifade edilen ve kırılabilirliğin kestiriminde kullanılan dayanım indeksi değişimlerinin fiziksel anlamda kırılabilirliği ifade etmediğini, aksine bu indekslerin mekanik değişimler olarak yorumlanması gerektiğini vurgulamıştır.

Grafik çözüm yöntemlerinin kullanılmasıyla elde edilen B_7 ve B_8 kırılabilirlik indeksi değerlerinin S_{20} kırılabilirlik indeksi değeri ile arasındaki düşük ilişki katsayıları (Bkz. Çizelge 4), Meng vd. (2015)'nin

Şekil 5. a) AIV ile S_{20} arasındaki ilişki b) B_3 kırılabilirlik indeksi ile S_{20} arasındaki ilişki.



bu savını destekler niteliktedir. S_{20} kırılma indeksi parçalanabilirlik (ufalanabilirlik) olarak yorumlandığında ise, dayanım indeks yöntemlerinin S_{20} değerinin kestiriminde kullanılması oldukça anlamlıdır.

Kahraman ve Toraman (2008) belirli tane boyutundaki (19 – 9.52 mm) 500 gr agregalı malzemesini belirli bir ağız açıklığına sahip çeneli kırıcıya besleyerek (çeneli kırıcı ağız açıklığı = 4 – 8 mm arasında) bir dizi parçalanma indeksi deneyleri gerçekleştirmiştir. Agregalarda meydana gelen parçalanmayı Parçalanma İndeksi (CI) olarak tanımlamış (9.52 mm'lik elekten geçen agregalı miktarının toplam agregalı miktarına olan oranı olarak) ve CI ile Los Angeles Aşınma Direnci (LAA) arasında anlamlı bir ilişkinin bulunduğunu ifade etmiştir.

Özçelik (2011) ise LAA ile σ_{ci} arasında anlamlı bir ilişki olduğunu belirtmiştir. Söz konusu bu çalışma da kayaçların dayanım – aşınma ilişkisini açık bir şekilde gözler önüne sermektedir.

S_{20} kırılma indeksi deneyi, kayaçların parçalanması ilkesine dayandığından, bu indeks değerinin kayaçların parçalanabilirliği açısından yorumlanması düşünülebilir. Çizelge 5'te önceki çalışmalarda S_{20} kırılma indeksi değerinin kestirimi amacıyla önerilen bazı görgül yaklaşımlar görülmektedir.

Çizelge 5'e göre, Yaşar vd. (2014) dışındaki görgül bağıntılarda S_{20} ile $\sigma_{t\beta}$, σ_{ci} ve B_3 kırılma indeksi arasında anlamlı ilişkiler olduğu görülmektedir. Yaşar vd. (2014), kayaçların kırılma özellikleri ile kazılabilirlik değişimlerinin araştırılmasını içermekte olup, bu çalışmada kireçtaşı, bazalt, bakır cevheri, kumtaşı, ve tuf gibi kayaçlar kullanmış ve kesme kuvveti ile B_3 arasında $R^2=0.80$ ve S_{20} ile arasında $R^2=0.17$ olan ilişki katsayıları belirlemiştir. Sözü edilen bu çalışmada kullanılan kayaçların σ_{ci} değerleri 50 – 120 MPa arasında, S_{20} değerleri ise %35 ile %62 arasında değişmektedir. Çoğunlukla orta dayanımlı kayaçların kullanıldığı ve istatistiksel analizler için örnek sayısının yeterli olmadığı (Çalışmada 6 örnek kullanılmıştır.) düşünüldüğünde S_{20} ile B_3 arasında anlamlı bir ilişkinin belirlenemeyişi açıklık kazanabilir.

Dahl (2003) tarafından kayaçların delinebilirlik indeksi olarak tanımlanan DRI (Drilling Rate Index)

değerinin belirlenmesinde S_{20} değeri bir dayanım değişirgesi gibi kullanılmaktadır.

Thuro ve Spaun (1996) kayaçların delinebilirliği üzerine yaptığı çalışmada, delme oranı (Drilling Rate, DR) ile σ_{ci} arasında $R^2=0.63$ ve DR ile B_1 kırılma indeksi arasında $R^2=0.02$ olan ilişki katsayıları belirlemiştir. Ancak Gerilme – birim deformasyon eğrisini kullanarak belirlediği yenilme anındaki deformasyon enerjisi (Thuro ve Spaun 1996'da Şekil 2'deki A_1+A_2 alanlarının toplamı deformasyon enerjisi olarak tanımlanmıştır.) ile DR arasında $R^2=0.85$ olan bir ilişki katsayısı belirlemiştir. Fiziksel olarak kırılma ve dayanımı yüksek olan kayaçların delme oranlarının sünek kayaçlara oranla daha düşük olduğunu ifade eden bu çalışmadan da anlaşılacağı üzere, gerilme – birim deformasyon eğrisini temel alan yaklaşımların kazı mekaniğinde daha anlamlı sonuçlar verdiği söylenebilir.

Bu çalışmada ise gerilme – birim deformasyon eğrisi kullanılarak B_7 ve B_8 kırılma indeksleri belirlenmiş ancak S_{20} ile aralarında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. B_7 ve B_8 kırılma indekslerinin S_{20} 'nin kestiriminde yetersiz kalışı, buna karşılık S_{20} ile AIV arasındaki anlamlı ilişki (Bkz. Çizelge 5), S_{20} deneyinin fiziksel olarak kayaçların parçalanma derecesinin bir göstergesi olduğunu ifade etmektedir.

Çizelge 5. S_{20} 'nin kestiriminde kullanılan bazı görgül bağıntılar.

Bağımsız Değişken	Görgül Bağıntı	R^2	Araştırmacı
$\sigma_{t\beta}$	$S_{20} = 66,44 - 2,32 \times \sigma_{t\beta}^{(*)}$	0,75	Su vd. 2014
σ_{ci}	$S_{20} = 74,05 - 0,56 \times \sigma_{ci}^{(*)}$	0,60	Su vd. 2014
σ_{ci}	$S_{20} = 65,48 \times e^{-0,006\sigma_{ci}}$	0,84	Hosseini vd. 2015
B_3	$S_{20} = 56,66 - 0,021 \times B_3$	0,35	Yaşar vd. 2014
B_3	$S_{20} = 53,98 - 0,037 \times B_3$	0,78	Su vd. 2014
B_3	$S_{20} = 86,77 - 8,32 \times \ln(B_3)$	0,78	Hosseini vd. 2015
B_3	$S_{20} = 101,6 - 10,20 \times \ln(B_3)$	0,81	Bu çalışma
AIV	$S_{20} = 10,90 + 1,50 \times AIV$	0,74	Bu çalışma

(*) Görgül bağıntıdaki bağımlı değişken (y) ve bağımsız değişken (x) değerleri yer değiştirilerek görgül bağıntı yeniden düzenlenmiştir.

Çizelge 3'te verilen deney sonuçları kullanılarak bir dizi istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda, özellikle kaya malzemesinin parçalanma derecesinin niceliksel olarak tanımlanmasını amaçlayan bir kaya malzemesi parçalanabilirlik sınıflaması geliştirilmiştir (Çizelge 6).

Çizelge 6. Bu çalışmada önerilen kaya malzemesi parçalanabilirlik sınıflaması.

S_{20} (%)	AIV (%)	B_3 (MPa ²)	Parçalanabilirlik
≥ 66	≥ 40	≤ 65	Oldukça Yüksek
65,9 - 60	40 - 35	65 - 100	Çok Yüksek
59,9 - 51,0	35 - 28	100 - 200	Yüksek
50,9 - 41	28 - 22	200 - 430	Orta
40,9 - 35	22 - 18	430 - 720	Düşük
34,9 - 29,1	18 - 14	720 - 1.200	Çok Düşük
≤ 29	≤ 14	≥ 1.200	Oldukça Düşük

Dahl vd. (2012) tarafından önerilen kırılma indeks sınıflamasına ait değer aralıkları

Çizelge 6'da ifade edilen değişirgeler, kırma – eleme tesislerinde kullanılan çeneli kırıcıların seçiminde, agregaların aşınma ve parçalanma derecesinin kestiriminde ve delme – patlatma uygulamalarında önemli bir konu olan özgül şarjın kestiriminde (İyi kalite kaya kütlelerinde: Jeomekanik sınıflama sistemi puanı, $RMR_{90} > 61$) bir ön tasarım aracı olarak kullanılabilir.

SONUÇLAR

Kayaçların parçalanabilirliğinin pratik olarak kestirimini amaçlayan bu çalışmada, S_{20} kırılma indeks değeri kayaçların parçalanabilirliği açısından incelenmiştir. On iki farklı kaya türünde gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları sonucunda, S_{20} kırılma indeksi ile önceki çalışmalarda sıklıkla kullanılan kırılma indeksleri arasında bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır.

Gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda S_{20} ile B_3 arasında anlamlı bir ilişki belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan agrega darbe dayanım deneylerinden elde edilen AIV değeri ile S_{20} arasında da anlamlı bir ilişki bulunmuştur.

Kayaçlardaki S_{20} kırılma derecesinin $\sigma_{ci} \geq 100$ MPa olduğu durumlarda belirgin olarak azaldığı

belirlenmiştir. Sonuç olarak kaya malzemesinin parçalanma derecesinin niceliksel olarak kestirimini amaçlayan bir sınıflama sistemi önerilmiştir.

Önerilen sınıflama sisteminin farklı madencilik uygulamalarında pratik olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışmada önerilen sınıflama sisteminin örnek sayısı artırılarak geliştirilmesi, ayrıca sınıflama sistemine ilave bağımsız değişirgelerin eklenmesi ile sınıflama sisteminin zenginleştirilmesi önerilmektedir.

NOT: Bu çalışma 6. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi'nde (18-21 Ekim 2017 - İzmir / Türkiye) sunulmuştur.

NOTE: This study was presented in 6th International Congress of Mining Machinery and Technology (18 - 21 October 2017 - Izmir / Turkey).

KAYNAKLAR

Altindag R 2002. The Evaluation of Rock Brittleness Concept on Rotary Blasthole Drills. J. South Afr. Inst. Min. Metall. 102 61–66.

Bruland, A. 1998. Drillability Test Methods. NTNU Trondheim.

BS 812-112 1990. British Standard: Testing Aggregates; Method for Determination of Aggregate Impact Value (AIV) 14pp.

Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka Y., Maejima T., Morioka H., Minami M. 2004. Generalized Crack Initiation and Crack Damage Stress Thresholds of Brittle Rock Masses near Underground Excavations. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 41 833–847.

Copur H., Bilgin N., Tuncdemir H., Balci C. 2003. A Set of Indices Based on Indentation Test for Assessment of Rock Cutting Performance and Rock Properties. J. South A. Inst. Min. Met. 103 (9) 589–600

Dahl, F. 2003. The Sugessted DRI, BWI, CLI Standards. NTNU, Angleggsdrift, Trondheim, Norway.

Dahl, F., Bruland A., Jakobsen P.D., Nilsen B., Grøv E., (2012) Classifications of Properties Influencing the Drillability of Rocks Based on the NTNU/SINTEF Test Method. Tunn. Undergr. Sp. Tech. 28 150–158.

Deere D.U., Miller R.P. 1966. Engineering Classification and Index Properties for Intact Rocks.

- Tech. Report. Air Force Weapons Lab., New Mexico, No. AFNL-TR, 65–116.
- Duthoit, V. 2000. Crushing and Grinding. Aggregates, Ch. 9, (Ed. Louis Primel and Claude Tourenq). Balkema, Rotterdam.
- Goktan, M. 1991. Brittleness and Micro-scale Rock Cutting Efficiency. *Min. Sci.Tech.*, 13 237–241.
- Gunaydin O., Kahraman S., Fener M. 2004. Sawability Prediction of Carbonate Rocks from Brittleness Indexes. *J. South Afr. Inst. Min.*, 104(4) 239–243.
- Guo Z., Chapman M., Li X. (2012). A Shale Rock Physics Model and Its Application in the Prediction of Brittleness Index, Mineralogy, and Porosity of the Barnett Shale. SEG Annual Meeting, Soc. Expl. Geophy., 1–5 Las Vegas, Nevada
- Hosseini R., Lashkaripour G.R., Moghadas N.H., Ghafoori M. 2015. Estimation of S_{20} -Brittleness (As An Input Parameter in Drilling Rate Index, DRI) Using Other Types of Brittleness. 11th Iranian and 2nd Regional Tunnel Conf. Tehran - Iran.
- Howarth, D.F., Rowlands, J.C. 1987. Quantitative Assessment of Rock Texture and Correlation with Drillability and Strength Properties. *Rock Mech. Rock Eng.* 20 (1) 57–85.
- Hucka V., Das B. 1974. Brittleness Determination of Rocks by Different Methods. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geo Abst.*, 11(10) 389–392.
- ISRM 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006. In: Ulusay R, Hudson JA (eds) Suggested methods prepared by the commission on testing methods. International Society for Rock Mechanics (ISRM), Ankara, Turkey.
- Kahraman, S. 2002. Correlation of TBM and Drilling Machine Performance with Rock Brittleness. *Eng. Geol.*, 65 269–283.
- Kahraman S., Toraman O.Y. 2008. Predicting Los Angeles Abrasion Loss of Rock Aggregates from Crushability Index. *Bull. Mat. Sci.* 31(2) 173–177.
- Meng F., Zhou H., Zhang C., Xu R., Lu J. 2015. Evaluation Methodology of Brittleness of Rock Based on Post-peak Stress–strain Curves. *Rock Mech. Rock Eng.* 48 1787–1805.
- Nejati H.R., Ghazvinian A. 2014. Brittleness Effect on Rock Fatigue Damage Evolution. *Rock Mech. Rock Eng.* 47(5):1839–1848
- Nejati H.R., Moosavi S.A. 2017. A New Brittleness Index for Estimation of Rock Fracture Toughness. *Min & Environ.* 8(1) 83–91.
- Ozcelik Y. 2011. Predicting Los Angeles Abrasion of Rocks from Some Physical and Mechanical Properties. *Sci. Res. Ess.* 6(7) 1612–1619
- Ozfirat M.K. Yenice H. Simsir F., Yarali O. 2016. A New Approach to Rock Brittleness and Its usability at Prediction of Drillability. *J. A. Earth Sci.* 119 94–101.
- Pang, S. S., Goldsmith, W. 1990. Investigation of Crack Formation during Loading of the Brittle Rock. *Rock Mech. Rock Eng.* 23 53–63.
- Protodyakonov, M.M. 1962. Mechanical Properties and Drillability of Rocks. - Proc. 5th Symp. on Rock Mech. 103–118. Minnesota: Univ.
- Schwartz, A. E. 1964. Failure of Rock in the Triaxial Shear Test. Proc. 6th Symp. Rock Mech. 109–135. Rolla Missouri.
- Sharma R.K., Chopra S. 2012. New Attribute for Determination of Lithology and Brittleness. 82nd Annual Int. Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1–4
- Singh, S.P. 1986. Brittleness and the Mechanical Winning of Coal. *Min. Sci.Tech*, 3 173–180.
- Su O., Sakız U., Köken E. 2014. Drillability Assessment of Rocks Based on Strength and Brittleness, 31st Ann. Int. Pittsburgh Coal Conf. (PCC 2014), 697–703.
- Tarasov B., Potvin Y. 2013. Universal Criteria for Rock Brittleness Estimation Under Triaxial Compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 59 57–69.
- Thuro K., Spaun G. 1996. Introducing the Destruction Work' as A New Rock Property of Toughness Referring to Drillability in Conventional Drill and Blast Tunnelling. the ISRM Int. Symp. (Eurock 1996), 707–713, Turin-Italy.
- Thuro K., Singer J., Käsling H., Bauer M. 2007. Determining Abrasivity with the LCPC Test. Proc. 1st Canada – U.S. Rock Mech. Symp., Vancouver B.C., London: Taylor & Francis. (Ed. E. Eberhardt, D. Stead and T. Morrison).

- Yagiz, S. 2009. Assessment of Brittleness Using Rock Strength and Density with Punch Penetration Test. *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 24 (1) 64–77.
- Yagiz, Gokceoglu C. 2010. Application of Fuzzy Inference System and Nonlinear Regression Models for Predicting Rock Brittleness. *Exp. Sys. App.*, 37 (3) 2265–2272.
- Yarali, O., Kahraman, S. 2011. The Drillability Assessment of Rocks Using the Different Brittleness Values. *Tunn. Undergr. Sp. Tech.* 26 (2) 406–414.
- Yaşar S., Yılmaz A.O., Çapık M. 2014. Kayaçların Kırılganlık Özellikleri ile Kazılabilirlik Değişirgele-ri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi. XI. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu (KAYAMEK), Afyonkarahisar.
- Xia Y.J., Li L.C., Tang. C.A., Li X.Y., Ma S., Li M. 2017. A New Method to Evaluate Rock Mass Brittleness Based on Dstress–strain Curves of Class I. *Rock Mech Rock Eng.* 50(5) 1123–1139.
- Weiss, N.L. 1985. Jaw Crushers, *SME Mineral Processing Handbook*, Chapter. 3B-1, (Ed. Weiss N.L.), SME/AIME, New York.
- Wills, B.A. 1992. *Mineral Processing Technology*. Pergamon Press, Oxford.
- Wawersik, W.R., Fairhurst, C.A. 1970. A Study of Brittle Rock Fracture in Laboratory Compression Experiments. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 7: 561–575.

