



Makale / Research Paper

Kayaçların Mekanik ve Delinebilirlik Özellikleri ile Öğütülebilirliği Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi

Utku SAKIZ^{1a*}

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

Zonguldak/TÜRKİYE

utku.sakiz@beun.edu.tr

Received/Geliş: 04.02.2021

Accepted/Kabul: 26.03.2021

Öz: Kayaçların delinebilirlik özellikleri, madencilik ile tünel açma işlemlerinde makine performansı ve maliyetler açısından oldukça önemli bir özelliktir. Bu nedenle, kayaç delinebilirliğine etki eden parametreler detaylı olarak incelenmelidir. Bu çalışmanın temel amacı, kayaç delinebilirliği ile öğütülebilirliği arasındaki ilişkinin, kayaçların mekanik ve sertlik özelliklerini de dikkate alınarak laboratuvar şartlarında araştırmaktır. Bu amaçla, magmatik (andezit örnekler) ve sedimanter (karbonat kökenli örnekler) kökenli ondört kayacın öğütülebilirliklerini belirlemek için Hardgrove öğütme indeks deney yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, Bond iş indeksi değerleri de literatürde önerilen yaklaşımlara göre hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler üzerinde yapılan istatistiksel analizler (regresyon analizi) andezit ve karbonat kayaçlarda öğütülebilirlik ile delinebilirlik arasında güçlü doğrusal ilişkiler (R^2 sırasıyla 0.99 ve 0.79) ortaya koymuştur. Bu gerçek ışığında, sınırlı veri ile elde edilen bu bilgiler, kayaçların delme oranı indeks (DRI) değerinin, basit bir deney yöntemi olan Hardgrove öğütülebilirlik değeri üzerinden oldukça başarılı bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Delme oranı indeksi, öğütülebilirlik, Hardgrove indeksi.

Investigation of the Relationships Between Rock Mechanical and Drillability Properties and Grindability

Abstract: Drillability of rocks is a very important properties in terms of machine performance and costs in mining and tunneling processes. For this reason, the parameters affecting the drillability of the rock should be analyzed in detail. The main objective of this study is to investigate the relationship between the drillability and grindability of the rocks, taking into account the mechanical and hardness properties of the rocks under laboratory conditions. For this purpose, Hardgrove grindability index test method has been carried out on fourteen rocks of magmatic (andesite samples) and sedimentary (carbonate origin samples) origin. Besides, Bond work index values have been calculated from the approaches suggested in the literature. Based on the findings of the present study, statistical analysis (regression analysis) were revealed between rock grindability and drillability (R^2 respectively 0.99 and 0.79) for andesite rocks and carbonate rocks. In the light of this fact, results obtained with limited data show that the drilling rate index (DRI) values of rocks, can be estimated very successfully through the Hardgrove grindability value, which is a simple test method.

Keywords: Drilling rate index, grindability, Hardgrove index.

1. Giriş

Madencilikte kazı çalışmaları, günümüzde çoğunlukla ya delme - patlatma ya da mekanik kazı yöntemleriyle yapılmaktadır. Seçilen yöntem ne olursa olsun, optimum kazı performansı için, uygun ekipman ve makine seçiminin oynadığı rol, oldukça önemlidir. Son yıllarda teknolojiye

Bu makaleye atıf yapmak için

Sakız, U., "Kayaç Öğütülebilirliği ile Mekanik ve Delinebilirlik Özellikleri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8 (2); 728-740.

How to cite this article

Sakız, U., "Investigation of the Relationships Between Rock Grinding and Mechanical and Drillability Properties" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8 (2); 728-740.

ORCID ID: 0000-0002-7246-0714

gelişmelerle birlikte, delik delme/sondaj sistemleri de önemli ölçüde gelişmiş ve çeşitli kayaç koşulları için farklı delme teknikleri geliştirilmiştir. Hızlı ve ekonomik bir delme işleminde, kayaç özelliklerinden makine parametrelerine kadar birçok faktör göz önünde bulundurulmalı ve verimli bir delme performansı için kaya kütlesi ve malzeme özelliklerinin doğrudan etkili olduğu dikkate alınmalıdır [1]. Dolayısıyla, gerçeğe yakın bir delinebilirlik tahmini, birçok kayaç özelliğinin (mekanik, indeks, fiziksel, kütle, mineralojik özellikler) birlikte değerlendirilmesiyle yapılmalıdır.

Tamrock [2] kayaçların delinebilirliğini, bir delici ucun kayaç içinde yapmış olduğu ilerleme hızı şeklinde tanımlamıştır. Bir delme işlemi sırasında, delici ucun kayaç ile olan etkileşim mekanizması kesme, parçalanma ve öğütme şeklindedir. Özellikle, elmas uçlu delicilerin kullanıldığı bir delme uygulamasında, delici uç üzerinde yer alan çok sayıda elmas tanesinin kayacı küçük parçalara ayırması nedeniyle, kayacın yenilmesi öğütme şeklinde gerçekleşir. Bu nedenle, delme işlemi sırasında kayaçta oluşan yenilme mekanizmasının özünde öğütme işlemi yer alır [3]. Dolayısıyla, delinebilirlik parametreleri ile öğütme mekanizması arasındaki ilişkinin, araştırılması gereklidir. Birçok araştırmacı, kayacın delinebilirlik özellikleri ile mineralojik ve fiziko – mekanik parametreleri arasındaki ilişkileri incelemiştir. Ancak, öğütülebilirlik ile kayaç delinebilirliği arasındaki ilişkilerin incelendiği detaylı bir çalışma yapılmamıştır.

Üretimde endüstriyel süreçler incelendiğinde, öğütme işlemi oldukça yaygın bir uygulama alanına sahiptir [4, 5]. Kayaç ya da cevherin öğütülebilirliği veya mekanik bir etkiye karşı göstermiş oldukları direnç, oldukça önemli bir malzeme karakteristiğini yansıtır. Kayaçların öğütülebilirliklerinin belirlenmesi amacıyla en çok kullanılan öğütülebilirlik testleri Bond ve Hardgrove indeks (HGI) deney yöntemleridir [5]. Bond öğütülebilirlik indeksi, her tür cevher ya da malzemenin öğütülebilirliğinin (Gbg) ve iş indeksinin (Bwi) belirlenmesi amacıyla kullanılan ancak oldukça zahmetli ve uzun zaman gerektiren bir deney yöntemidir. Genellikle kömür örneklerinin öğütülebilirliğinin tayini için kullanılan Hardgrove indeks deney yöntemi ise, pratik ve kolaylıkla uygulanabilen bir deney yöntemi olarak, son yıllarda kayaç örneklerinin öğütülebilirliklerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır [6, 7].

Kayaç veya cevherlerin, öğütülebilirlik özellikleri ile fiziko – mekanik ve mineralojik özellikleri arasındaki ilişkiler birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Deniz vd. [8] kömür örnekleri üzerinde yürüttükleri çalışmada, Bond öğütülebilirlik indeksi (Gbg) ile nokta yükü dayanım indeksi özellikleri arasında yüksek korelasyonlu ilişkiler elde etmiştir. Su [9] ve Su vd. [10, 11] Zonguldak taşkömürü havzasına yönelik yapmış oldukları çalışmada, kömür örneklerinin öğütülebilirliğinin belirlenmesinde HGI deneyinden yararlanmışlar ve kömürlerin HGI özellikleri ile darbe dayanım indeksi arasında pozitif güçlü ilişkiler belirlemişlerdir. Tiryaki vd. [12] ve Tiryaki [13] yaptıkları çalışmalarda, Çayırhan kömürlerinin sertlik özellikleri ile HGI özellikleri arasında güçlü ilişkiler elde etmişlerdir. Kömür örnekleri üzerine bir başka çalışmada ise Deniz ve Umucu [14], kömürün fiziko mekanik özelliklerinin yanında nem, karbon, kül içeriği gibi kısa analizlerin etkisini de incelenmişler ve bu analiz sonuçlarına dayalı olarak geliştirdikleri çoklu regresyon analizlerinde, Gbg için güçlü bir ilişki belirlemişlerdir.

Bond öğütülebilirlik parametreleri (Bwi ve Gbg) üzerinden kayaçların öğütülebilirliğinin tayini ise ilgili literatürde farklı araştırmacılar tarafından çeşitli kayaç özellikleri göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Deniz ve Özdağ [15] yapmış oldukları çalışmada, öğütmenin dinamik bir etki olduğunu dikkate alarak, magmatik ve sedimanter kökenli kayaçlar üzerinde Bond öğütülebilirlik parametreleri (Bwi ve Gbg) ile dinamik elastik parametreler (elastisite, kayma ve bulk modüllü) arasında istatistiksel olarak güçlü doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkiler elde etmişlerdir. Ozkayhan [16], kayaç delinebilirliğinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan delme oranı indeks deneyinin önemli bir parametresi de olan kayaç kırılma (S20) özelliği ile Bond öğütülebilirlik parametreleri (Bwi ve Gbg) arasında çok yüksek korelasyon katsayıları belirlemiştir. Şengün vd. [17] sedimanter

kökenli kayaçlar ve mermerler için Bond öğütülebilirliği ile Shore sertliği ve nokta yükü dayanım indeksi arasında yüksek negatif korelasyonlar tespit etmişlerdir. Kecec vd. [18] kayaçların dokusal özelliklerinin, öğütülebilirlik üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmada, kayaçların dokusal ve fiziko-mekanik özelliklerinden yararlanarak bazı bağıntılar türetmişler ve fiziko-mekanik özelliklerin öğütme üzerinde daha etkili olduğunu belirlemişlerdir. Aras vd. [19], nokta yükü dayanım indeksi değerleri ile Gbg arasında negatif yönlü, Bwi arasında ise pozitif yönlü güçlü ilişkiler elde etmişlerdir. Abdelhaffez [6], Bwi ile cevherlerin mekanik özellikleri (Rockwell sertliği, aşınma, basınç dayanımı ve elastisite modülü) arasındaki ilişkileri incelemiş, Bwi ile basınç dayanımı ve elastisite modülü arasında yüksek korelasyonlar elde etmiştir. Chandar vd. [20] yoğunluk, darbe dayanım indeksi ve geri sıçrama sertliği gibi basit kayaç özellikleri kullanarak Bwi tahmini yapmışlar ve çok güçlü ilişkiler belirlemişlerdir. Kahraman vd. [21] granit kayaç örneklerinin öğütülebilirliklerini, d50 boyutu ile fiziko-mekanik ve mineralojik özellikleri üzerinden araştırmışlardır. Abdelhaffez [22] farklı mineralojik bileşimler ve dokular gösteren altın cevherlerinin öğütülmesinde, mekanik (basınç dayanımı ve elastisite modülü) ve petrografik özellikler ile Bwi arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Park ve Kim [4] çekme dayanımı ve Bond iş indeksi (Bwi) parametreleri ile delme esnasındaki ilerleme hızı (PR) verilerini ilişkilendirmişlerdir. Aras vd. [23], Schmidt sertliği, tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, nokta yükü dayanım indeksi, ultrasonik hız, yoğunluk gibi kayaç özelliklerini yapay sinir ağlarında kullanarak Bwi değerlerini tahmin etmişlerdir. Yukarıda özetlenen çalışmalarda da görüldüğü üzere, araştırmacılar, Bond öğütülebilirlik parametrelerinin (Bwi ve Gbg), kayaç özellikleri ile pratik bir şekilde tahmini üzerine yoğunlaşmıştır.

Son yıllarda, bazı araştırmacılar, kayaç öğütülebilirliğinin ve Bond parametrelerinin tayini için basit ve kullanışlı bir yöntem olarak HGI'dan yararlanmışlardır. Musci [24] evrensel Hardgrove değirmeni kullanarak kırılğan malzemeler için Bwi'nin belirlenmesi amacıyla nispeten hızlı alternatif yolları araştırmıştır. Swain ve Rao [7] kayaçlar üzerinde yapmış oldukları çalışmada, HGI ile hesaplanmış oldukları Bwi değerleri ile deneysel çalışmalardan elde ettikleri Bwi değerleri arasında oldukça güçlü bir ilişki elde etmişlerdir. Araştırmacılar, kayaçların öğütülebilirliklerinin, pratik bir deney yöntemi olan HGI ile kolaylıkla tespit edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Özellikle, konu ile ilgili olarak yapılan araştırmalar irdelendiğinde, HGI deney yöntemi, oldukça pratik ve uygulama kolaylığı olan bir yöntem olarak giderek önem kazandığı görülmektedir. Ayrıca, HGI'nın kayaç öğütülebilirliğinin belirlenmesinde kullanılması, uygulama açısından kolaylık sağlamaktadır.

Kazı ve kaya mekaniğinde kayaçların kütsel, mekanik, delinebilirlik ve kırılma-öğütme parametrelerinin gerçek zamanlı olarak belirlenmesi emek yoğun ve zaman alıcı bir işlemdir [4]. Bu kapsamda, söz konusu kayaca ait özelliklerin; hızlı, basit ve gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilmesi, önemli bir kolaylık sağlamaktadır. Hardgrove indeks deneyi, malzeme öğütülebilirliğinin tanımlanmasında kullanılan en basit yöntemlerden biri olmasına rağmen, bu yöntemle kayaçların öğütülebilirlik özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu gerçek ışığında bu çalışmada, HGI değerleri ile kayaçların delinebilirlik, mekanik ve sertlik özellikleri arasındaki istatistiksel ilişkiler araştırılmıştır. HGI değerleri ayrıca, Bwi'nin hesaplanmasında da kullanılmıştır. Son olarak, HGI ile kayaçların mekanik, sertlik ve delinebilirlik özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

Çalışma kapsamında, dokuzu sedimanter karbonat kökenli ve beşi magmatik kökenli andezit kayacı olmak üzere toplam ondört farklı kayaç örneği incelenmiştir. Bu kayaçların bir kısmının mekanik ve sertlik deneyleri ISRM [25, 26], delme deneyleri ise Dahl [27] tarafından önerilen yöntemlere göre Yaralı vd. [28], Aldı [29] ve Sakız [30] tarafından önceki çalışmalarda araştırılmış ve kayaçların

fiziko-mekanik ve delinebilirlik özellikleri incelenmiştir. İncelenen kayalar için uygulanan mekanik ve delinebilirlik deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur. Bu çalışmada ise, önceki çalışmalardan farklı olarak kayaların öğütülebilirlik özellikleri Hardgrove indeks yöntemiyle araştırılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan kayaların mekanik, sertlik ve delinebilirlik değerleri [28-30].

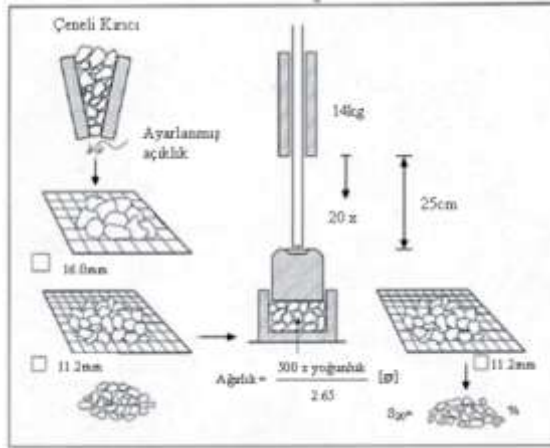
Örnek Adı	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	SH	SJ	S20	DRI
Andezitik basalt*	77.80	9.42	42.20	119.71	48.00	64
Porfirik andezit*	82.93	5.17	42.00	91.53	55.26	69
Traki andezit*	104.53	5.75	68.85	39.07	60.48	60
Bazaltik andezit*	92.53	11.20	64.45	91.73	51.96	63
Bazaltik andezit*	28.61	2.57	24.05	103.68	74.43	86
Kireçtaşı*	78.24	10.34	46.55	60.80	47.37	58
Dolomitik kireçtaşı*	51.37	5.66	47.95	32.18	57.24	63
Kireçtaşı*	78.99	9.08	49.65	75.03	57.44	68
Dolomitik kireçtaşı*	31.57	4.36	23.10	91.68	62.12	73
Mermer**	94,70	12.38	36.50	43.50	44.70	51
Mermer***	44.95	7.99	13.50	95.80	57.38	69
Mermer***	64.00	7.10	-	56.00	57.00	66
Kireçtaşı***	89.00	8.40	-	68.90	53.00	63
Kireçtaşı***	97.00	8.00	-	60.00	42.00	52

σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, σ_t : Dolaylı çekme dayanımı, SH: Shore sertliği, Sj: Siever's minyatür delme, S20: kırılgenlik değeri, DRI: Delme oranı indeksi

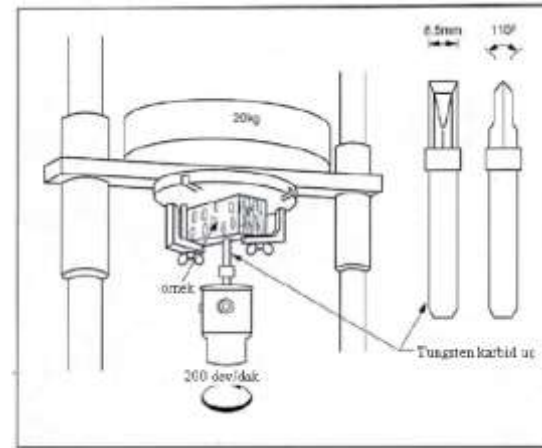
*Yaralı vd. [28], **Aldı [29], ***Sakız [30]

2.1 Delme Oranı İndeksi (DRI)

DRI, kayaların delinebilirliğinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan ve kayaç delinebilirliğinin ölçüsünü veren indeks bir deney yöntemidir. Yöntem, başlıca iki deneyden (kırılgenlik ve Sievers minyatür delme deneyleri) elde edilen sonuçların bir abakta değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu amaçla, öncelikle kayaç örneklerinin kırılgenlik (Şekil 1) ve Sievers minyatür delme (Şekil 2) deneyleri yapılmıştır.

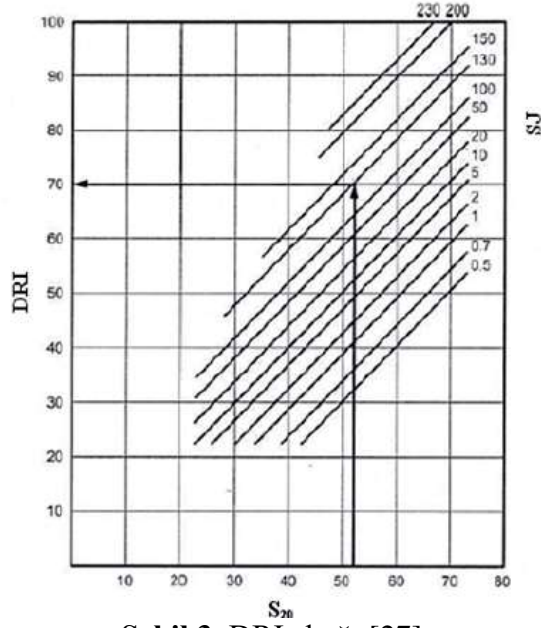


Şekil 1. S20 deney düzeneği [27].



Şekil 2. Sj delme deney düzeneği [27].

Her iki deneyden elde edilen sonuçların, Şekil 3'te verilen abakta değerlendirilmesiyle, incelenen kayaç örnekleri için DRI değerleri elde edilmiştir. DRI değerlerine yönelik olarak önerilen delinebilirlik sınıflaması ise, Tablo 2'de ayrıca verilmiştir.



Şekil 3. DRI abağı [27].

Tablo 2. DRI sınıflaması [27].

Sınıf	Değer
Oldukça düşük	≤ 25
Çok düşük	26 – 32
Düşük	33 – 42
Orta	43 – 57
Yüksek	58 – 69
Çok yüksek	70 – 82
Oldukça yüksek	≥ 83

2.2 Öğütülebilirlik Deneyleri

2.2.1 Hardgrove İndeksi

Hardgrove indeks deneyi, ASTM D5003 [31] standardına uygun olarak, bilyalı değirmen kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Bu kapsamda, ilk olarak her bir kayaç için $-1180 \mu\text{m} + 600 \mu\text{m}$ boyutunda 50 gramlık numuneler ayrı ayrı hazırlanmıştır. Daha sonra, hazırlanan numuneler Hardgrove indeks değirmeninde 60 devir çevrimden geçirilerek öğütülmüştür.



Şekil 4. Hargrove indeksi deney aleti.

Son olarak da, öğütülmüş malzeme 200 mesh elek boyutundan elenmiş ve Hardgrove indeks değerleri aşağıda verilen Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$HGI = 13 + 6.93m_H \quad (1)$$

Burada, HGI Hardgrove indeksi ve m_H , 200 mesh'lik elekten geçen parçacıkların ağırlığıdır (gr). Deneylerde, bağıl sapması %3'ü geçmeyen iki ila üç paralel ölçümün ortalaması dikkate alınmıştır.

2.2.2 Bond İndeksi

Bond indeksi, kapalı devre kuru bir öğütme işlemi sonucunda, kayaçların kırılma ve öğütülmeye karşı göstermiş oldukları direncin bir ölçüsü olarak temel bir malzeme karakteristiğini vermektedir. Besleme boyutu 6 mesh ve ürün boyutu 100 mesh olan öğütülmüş kayaç için spesifik enerjiyi temsil etmektedir [4],[32,33]. Bu çalışma kapsamında, incelenen kayaç türleri için Bond indeks değerleri HGI yöntemi üzerinden tahmin edilmeye çalışılmıştır.

2.2.3 HGI Öğütülebilirlik Değeri ile Bond Arasındaki İlişki

Bond ve HGI deney yöntemleri, malzeme öğütülebilirliğinin tespitinde, birçok endüstriyel proses tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda, HGI deney yöntemi çoğunlukla kömürlerin öğütülebilirliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılıyor olsa da, aynı zamanda diğer hammaddelerin öğütülebilirliğinin tayini için de uygulanabilmektedir. Bond deneyi ise, özellikle kayaç örneklerinin öğütülebilirliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bond deneyinden elde edilen sonuçlara dayanarak, malzemelerin öğütülmesi için gerekli enerji miktarı ampirik olarak hesaplanabilmektedir. Ancak, her iki deney yöntemi birbiriyle karşılaştırıldığında, basit bir deney performansına sahip olan HGI deneyi, daha tercih edilebilir bir yöntem niteliği taşımaktadır [34].

Tablo 3. HGI değerlerinden Bond iş endeksinin (B_{wi}) hesaplanması için geliştirilen ampirik yaklaşımlar.

Önerilen Görgül Eşitlik	Araştırmacı	Çalışılan Birimler
$B_{wi} = \frac{88}{HGI^{0.5}}$	Bond [35]	
$B_{wi} = \frac{435}{HGI^{0.91}}$	Bond [36]	Kömür
$B_{wi} = \frac{435}{HGI^{0.82}}$	Hease vd. [37]	Kireçtaşı-Marn
$B_{wi} = \frac{1622}{HGI^{1.08}}$	McIntyre ve Plitt [38]	Kireçtaşları
$B_{wi} = 14.56 - 0.10 HGI$	Hower vd. [39]	Karbonat Kökenli Kayaçlar
$B_{wi} = \frac{468}{HGI^{0.82}}$	Csöke vd. [40]	Boksit

* $B_{wi} > 8.5$ kWh/ton olan malzemeler için geçerlidir.

Literatürde, HGI ve Bond deneylerinden elde edilen sonuçlar arasındaki ilişkilerin araştırıldığı çalışmalar [35-40] incelendiğinde, HGI değerlerine bağlı olarak Bond iş endeksinin hesaplanması amacıyla geliştirilen ampirik yaklaşımlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3'te verilen yaklaşımlar irdelendiğinde, Bond [35,36], kömürler üzerinde yapmış olduğu çalışmalarda HGI ile Bond arasındaki ilişkileri incelemiştir. Hease vd. [37] ve McIntyre ve Plitt [38] ayrı ayrı yapmış oldukları çalışmalarda, Bond tarafından kömürler için geliştirilen yaklaşımı kireçtaşları ve diğer kırılğan malzemelere yönelik olarak geliştirmişlerdir. Benzer bir model, Csöke vd. [40] tarafından boksit türleri için önerilmiştir. Bir diğer çalışmada ise Hower vd. [39], karbonat

kökenli kayaçlar için HGI ve Bond arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlardır. Swain ve Rao [7], boksit örnekleri, Rattanakawin ve Tin [41] ise sodyum feldspat örnekleri için yapmış oldukları çalışmada, laboratuvar ortamında kendi ölçtükleri Bwi değerleri ile hesaplamış oldukları Bwi değerleri arasında ($R^2=0.99$) oldukça yüksek bir ilişki elde etmişlerdir.

Herhangi bir malzeme türü için, Bond deneyinde, yapılan eleme işlemi sabit bir duruma ulaşımaya kadar ard arda birkaç öğütme çevriminin yapılması gerekliliği vardır. Dolayısıyla deney süreci uzun zaman almaktadır. Buna karşın, kayaçların öğütülebilirlik değerleri, basit bir test yöntemi olan HGI ile birkaç dakikalık bir deney sonucunda kolaylıkla elde edilebilmektedir [7]. Bu çalışma kapsamında, incelenen kayaç türleri için elde edilen HGI değerleri ve hesaplanan Bwi değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. Çalışmada Bwi değerleri, incelenen kayaç kökenleri de göz önünde bulundurularak, kireçtaşı ve karbonat kökenli kayaç türlerine yönelik olarak önerilen yaklaşımlar üzerinden hesaplanmıştır.

Tablo 4. Kayaç örnekleri için hesaplanan HGI ve Bwi değerleri.

Örnek Adı	Bwi (KWh/ton)			
	HGI	Haese vd. [37]	McIntyre ve Plitt [38]	Hower vd. [39]
Andezitik bazalt	77	12.29	14.79	6.82
Porfirik andezit	93	10.60	12.18	5.29
Traki andezit	66	13.95	17.47	7.92
Bazaltik andezit	74	12.76	15.54	7.16
Bazaltik andezit	132	7.96	8.35	1.41
Kireçtaşı	51	17.18	23.00	9.41
Dolomitik kireçtaşı	75	12.57	15.23	7.02
Kireçtaşı	80	12.02	14.37	6.61
Dolomitik kireçtaşı	112	9.07	9.92	3.35
Mermer	53	16.72	22.19	9.24
Mermer	95	10.41	11.89	5.08
Mermer	73	12.86	15.70	7.23
Kireçtaşı	63	14.58	18.52	8.27
Kireçtaşı	55	16.20	21.29	9.03

HGI: Hardgrove indeksi, Bwi: Bond iş indeksi (KWh/ton)

3. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Tartışma

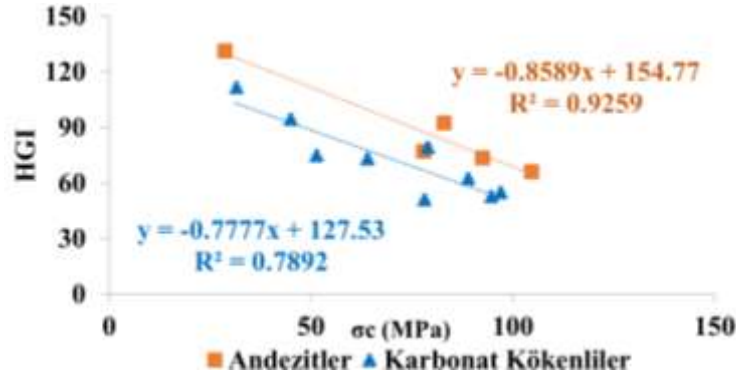
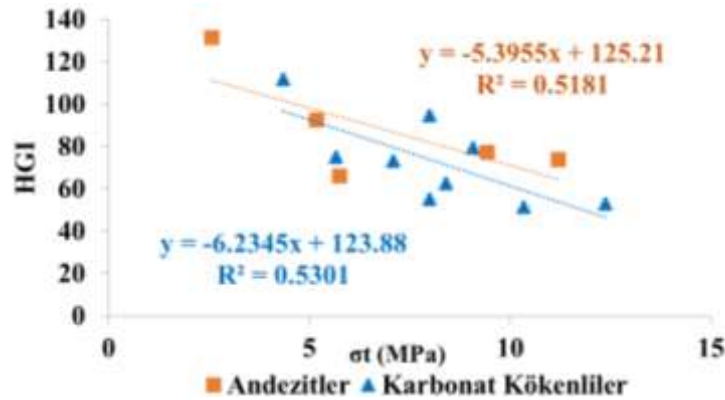
Delik delme işlemi sırasında, kayacın yenilmesi, darbeye bağlı öğütme şeklinde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, delme işlemi sırasında kayaç öğütülebilirliğinin, delme işlemine olan etkisinin irdelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, konu ile ilgili çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, kayaçların basma ve çekme dayanımları ve sertlik değerlerinin, kırma-öğütme sürecini etkileyen önemli kayaç özellikleri olarak ön plana çıktığı görülmektedir.

Bu çalışmada incelenen dokuz karbonat kökenli ve beş andezitik kayaç türüne ait mekanik, delinebilirlik ve öğütülebilirlik parametreleri arasındaki doğrusal ilişkiler Tablo 5'te verilen korelasyon matrisinde sunulmuştur. Çalışma kapsamında, kayaç özellikleri ile HGI ve Bwi arasındaki ilişkiler ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Buna göre, mekanik özellikler ile HGI arasında negatif yönlü ve Bwi ile pozitif yönlü doğrusal ilişkiler elde edilmiştir. Bu durum, kayacın dayanımının artmasına bağlı olarak kırılmaya karşı olan direncin artmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, kayaç dayanımı arttıkça HGI değerleri düşmekte ve kayacı öğütmek için gerekli olan enerji miktarı artmaktadır. Tablo 5 incelendiğinde, SJ ve S20 ve DRI değerleri ile HGI arasında sırasıyla 0.62, 0.84 ve 0.95 pozitif yönlü istatistiksel olarak güçlü ilişkiler belirlenmiştir. Benzer bir durum, Bwi ile delinebilirlik parametreleri arasında negatif yönlü olarak elde edilmiştir.

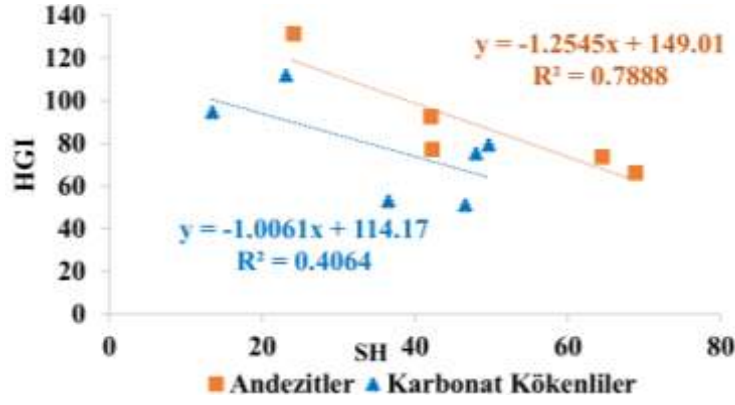
Tablo 5. Kayaç özelliklerin korelasyon matrisi.

	σ_c	σ_t	SH	S _J	S ₂₀	DRI	HGI	<u>Bwi</u> [37]	<u>Bwi</u> [38]	<u>Bwi</u> [39]
σ_c	1.00									
σ_t	0.57	1.00								
SH	0.82	0.30	1.00							
S _J	-0.34	-0.14	-0.44	1.00						
S ₂₀	-0.66	-0.79	-0.30	0.24	1.00					
DRI	-0.75	-0.71	-0.50	0.60	0.90	1.00				
HGI	-0.79	-0.74	-0.61	0.62	0.84	0.95	1.00			
<u>Bwi</u> [37]	0.73	0.71	0.50	-0.62	-0.82	-0.92	-0.96	1.00		
<u>Bwi</u> [38]	0.71	0.70	0.48	-0.62	-0.81	-0.91	-0.95	0.99	1.00	
<u>Bwi</u> [39]	0.79	0.74	0.61	-0.62	-0.84	-0.95	-1.00	0.96	0.95	1.00

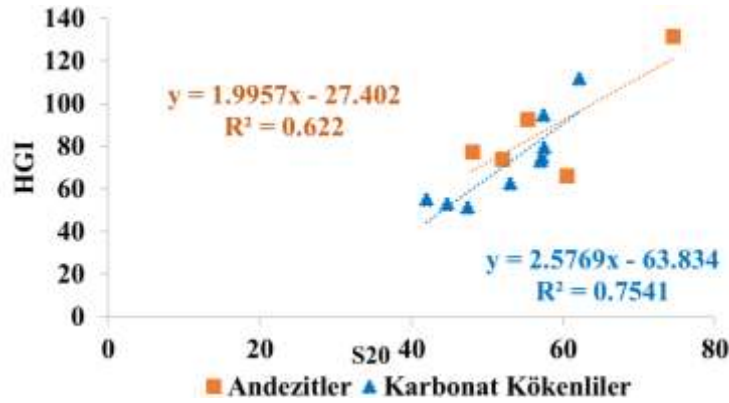
σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, σ_t : Dolaylı çekme dayanımı, SH: Shore sertliği, S_J: Siever's minyatür delme, S₂₀: kırılma değeri, DRI: Delme oranı indeksi, HGI: Hardgrove indeksi, Bwi Bond iş indeksi (KWh/ton)

**Şekil 5.** Basınç dayanımı ile HGI arasındaki ilişkiler.**Şekil 6.** Dolaylı çekme dayanımı ile HGI arasındaki ilişkiler.

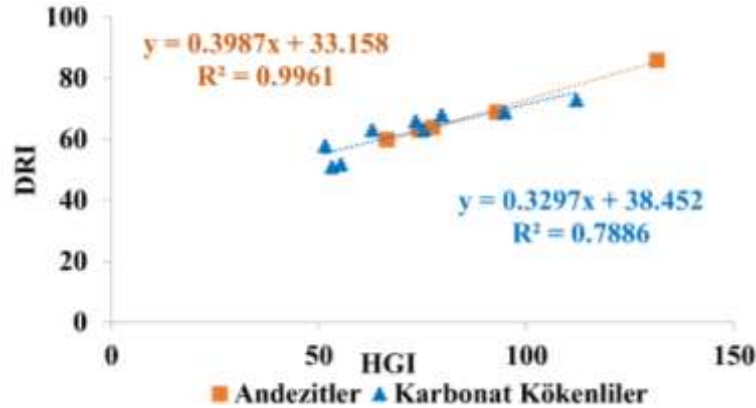
Çalışmada, kayaçların mekanik, sertlik ve delinebilirlik özellikleri ile öğütülebilirlik özellikleri arasındaki ilişkiler, basit regresyon analizleri ile incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5-9'da gösterilmiştir. Şekil 5-9'da verilen grafiklerde, kayaçlar kökenlerine göre magmatik kökenli andezit kayaçlar ile sedimanter karbonat kökenli kayaçlar olmak üzere iki kategoride irdelenmiştir. Böylece farklı kökenlerdeki kayaç grupları için ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 7. Shore sertliği ile HGI arasındaki ilişkiler.



Şekil 8. S20 kayaç kırılmalık değerleri ile HGI arasındaki ilişkiler.



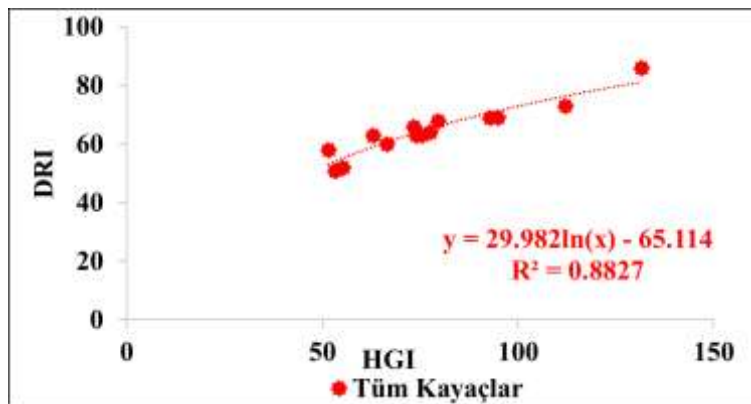
Şekil 9. Kökenleri göre kayaç türleri için DRI ile HGI arasındaki ilişkiler.

Kayaçların basınç dayanımları ile öğütülebilirlikleri arasındaki ilişkiler andezit ve karbonat kökenli kayaçlar için sırasıyla $R^2=0.92$ ve $R^2=0.79$ olarak elde edilmiştir (Şekil 5). Bu çalışmada, kayaçların basınç dayanımları ile öğütülebilirlikleri arasında elde edilen ilişkiler, Abdelhaffez'in [6] Bwi ile basınç dayanımı arasında logaritmik güçlü ($R^2=0.81$) bir ilişkinin belirlendiği çalışma ile benzerlik göstermektedir. Özkahraman [16] ise yapmış olduğu çalışmada, Bwi ile çekme dayanımı arasındaki ilişkinin, Bwi ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiden daha iyi olduğunu belirtmiştir. Özer ve Çabuk [42], kalker ve kromit cevherleri üzerinde yapmış oldukları çalışmada ise Bwi ile tek eksenli basınç dayanımı ($R^2=0.58$) ve dolaylı çekme dayanımı ($R^2=0.15$) arasında istatistiksel olarak nispeten zayıf ilişkiler belirlemişlerdir. Yapılan bu çalışmada ise, kayaç kırılma mekanizmasının önemli bir

parametresi olan çekme dayanımı ile öğütülebilirlik parametresi (HGI) arasında Özer ve Çabuk [42] tarafından yapılan çalışmaya oranla daha iyi ilişkiler elde edilmiştir (Şekil 6).

Öğütülebilirlik parametreleri ile sertlik arasındaki ilişkiler, andezit kayalar için $R^2=0.79$ ve karbonat kökenli kayalar için ise $R^2=0.40$ olarak elde edilmiştir. İncelenen kayaç örneklerinin, Shore sertlik değerleri arttıkça öğütülebilirlikleri azalmaktadır. Abdelhaffez [6], Rockwell sertliği ile Bwi arasındaki ilişkiyi incelemiş ve determinasyon katsayısını $R^2=0.75$ olarak belirlemiştir. Şengün vd. [17], Bond öğütülebilirlik parametresi Gbg ile kayaların fiziko-mekanik özellikleri arasında en etken kayaç özelliğinin Shore sertliği olduğunu vurgulamıştır. Özer ve Çabuk [42], Shore sertliği ile Bwi arasında güçlü bir ilişki olduğunu belirlemiştir ($R^2=0.87$). Konu ile ilgili yapılan çalışmalar, özellikle andezit kayalar için belirlenen ilişkiler ile benzerlik göstermektedir. Ancak, karbonat kökenli kayalar için benzer bir ilişki elde edilememiştir. Bu durum, kayaların köken ve mineral farklılıklarından kaynaklanmaktadır.

Literatürde, doğrudan DRI ile öğütülebilirlik parametreleri arasındaki ilişkinin incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak, kayaların en önemli mekanik özelliklerinden biri olan kırılabilirlik parametresi ile öğütülebilirlik arasındaki ilişkiler farklı araştırmacılar tarafından irdelenmiş [7],[16] ve oldukça güçlü ilişkiler elde edilmiştir. Kayaların kırılabilirliği, farklı araştırmacılar tarafından çeşitli şekillerde tanımlanmış ve kullanılmıştır. Bu kapsamda, S20 deney yöntemi, tekrarlanan darbeler sonucu kayaların kırılmaya karşı göstermiş olduğu direncin bir ölçüsü ve DRI'nın iki önemli parametresinden biridir [27]. Özkahraman [16], dört farklı kayaç örneği (kireçtaşı, mermer, boksit ve barit) için S20 ile Bwi arasında $R^2=0.97$ 'lik logaritmik bir ilişki olduğunu belirlemiştir. Swain ve Rao [7] ise altı boksit kayacı için kırılabilirlik ile Bwi arasında $R^2=0.93$ 'lük doğrusal bir ilişki elde etmişlerdir. Bu çalışmada, S20 ile HGI arasında, andezit kayalar için $R^2=0.62$ ve karbonat kökenli kayalar için $R^2=0.75$ olan istatistiksel olarak doğrusal güçlü ilişkiler belirlenmiştir. Delinebilirlik açısından irdelendiğinde ise, öğütülebilirlik parametresi HGI ile DRI arasındaki ilişki, andezit kayalar ve karbonat kökenli kayalar için sırasıyla $R^2=0.99$ ve $R^2=0.79$ olarak elde edilmiştir. Kayalar, farklı kökenlerde ve heterojen malzemelerdir. Dolayısıyla, bu çalışma kapsamında, öncelikle bu durum dikkate alınmış ve incelenen kayalar iki grupta değerlendirilmiştir. Yapılan istatistiksel değerlendirmelerde, DRI ile HGI parametreleri arasında oldukça yüksek ilişki katsayıları elde edilmiştir. Daha genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla çalışmada kullanılan tüm kayalara ait veriler birlikte değerlendirildiğinde, DRI ile öğütülebilirlik parametreleri arasındaki ilişkiler Şekil 10'daki gibidir. Şekil 10'da da görüldüğü üzere, öğütülebilirlik parametreleri ile kayaç delinabilirliği arasında azalarak artan logaritmik güçlü bir ilişkinin ($R^2=0.88$) olduğu belirlenmiştir.



Şekil 10. Tüm kayaç örnekleri birlikte değerlendirildiğinde, DRI ile HGI arasındaki ilişkiler.

Bir kayacın kırma ve öğütme aşamalarındaki durumunun önceden ve basit yöntemler ile irdelenmesi, delinabilirlik ve kazı çalışmaları açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla, DRI ile HGI arasında kurulan ilişkiler incelendiğinde, delinebilirliğin kolay olduğu durumlarda HGI değerleri

artmakta ve dolayısıyla kayacı parçalamak için gerekli olan enerji miktarı azalmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen bulgular neticesinde, kayacın delinebilirlik özellikleri ile HGI öğütülebilirlik özellikleri arasında bir sınıflama geliştirilmiştir (Tablo 6).

Tablo 6. Delinebilirlik – Öğütülebilirlik sınıflaması.

Öğütülebilirlik Sınıfı	HGI	DRI*	Delinebilirlik Sınıfı*
Oldukça zor	≤23	≤25	Oldukça düşük
Çok zor	24-29	26 – 32	Çok düşük
Zor	30-39	33 – 42	Düşük
Orta	40-61	43 – 57	Orta
Kolay	62-87	58 – 69	Yüksek
Çok Kolay	88-128	70 – 82	Çok yüksek
Oldukça Kolay	≥129	≥83	Oldukça yüksek

*Dahl[27]

Araştırmacılar, genellikle bir kayacın kazılabilirliği ya da delinebilirliğini, kolayca elde edilebilen kaya özellikleri ile tahmin etme arayışı içerisindeyler. Bu çalışma, DRI parametresinin, kayacın HGI özelliği ile pratik olarak tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak, daha güvenilir bir sınıflama önerisi ve tahmin modeli için incelenen kayaç sayısı artırılmalı ve kayaçlar kökenlerine göre ayrıca değerlendirilmelidir. İlave olarak, öğütülebilirlik sınıflamasına yönelik aralıkların hassasiyeti incelenmelidir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmanın amacı, HGI parametresi ile kayaçların mekanik, sertlik ve delinebilirlik özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemek ve tartışmaktır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Kayaçların mekanik özellikleri (σ_c ve σ_t) arttıkça, HGI değerleri azalmakta ve Bwi değerleri artmaktadır
- Karbonat kökenli kayaçların SH değerleri ile HGI arasında istatistiksel olarak yüksek bir ilişki elde edilememiş ancak, andezitik kayaçların SH değerleri ile HGI arasında ise güçlü bir ilişki belirlenmiştir.
- DRI ve kırılgenlik değeri (S20) dikkate alındığında ise, HGI ile pozitif yönlü, Bwi ile ise negatif yönlü güçlü ilişkiler elde edilmiştir. Özellikle her iki kayaç grubu için DRI ile HGI arasında kurulan ilişkiler incelendiğinde, delinebilirliğin nispeten kolay olduğu durumlarda HGI değerleri artmakta ve dolayısıyla kayacı parçalamak için gereken Bwi değerleri azalmaktadır.
- Çalışma kapsamında ayrıca, kayaçların delinebilirlik özellikleri ile HGI öğütülebilirlik özellikleri arasında bir sınıflama geliştirilmiştir. Ancak incelenen kayaç sayısı sınırlıdır. Bu nedenle de daha güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla kayaç sayısı artırılmalı ve farklı kayaç türlerinin etkisi de incelenerek, önerilen sınıflama aralıklarının hassasiyeti irdelenmelidir.

Teşekkür

Yazar, 104M437 projesi için TÜBİTAK'a ve BAP-2015-98150330-01 projesi için Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'ne, değerli yorum ve önerileri için Prof. Dr. Olgay Yaralı, Prof. Dr. Hamit Aydın, Doç. Dr. Okan Su ve Arş. Gör. Dr. Haşim Duru'ya (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi) teşekkürlerini sunar.

Yazar(lar)ın Katkıları

US çalışmalarını yaptı ve makaleyi yazdı. Yazar makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Hoseinie, S., H., Aghababaei, H., and Pourrahimian, Y., Development of a New Classification System For Assessing of Rock Mass Drillability Index (RD_i), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2008, 45(1), 1–10.
- [2]. Tamrock, *Handbook of Underground Drilling*. 1987.
- [3]. Özçelik, Y., *Mermercilikte Elmas Tel Kesme Makinalarının Çalışma Koşullarının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 1999.
- [4]. Park, J., and Kim, K., Use of Drilling Performance to Improve Rock-Breakage Efficiencies: a Part of Mine-to-Mill Optimization Studies in a Hard-Rock Mine, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2020, 30(2), 179–188.
- [5]. Mucsi, G., Rácz, A., Mag, G., Antal, G., and Csöke, B., Volume Based Closed-Cycle Hardgrove Grindability Method, *Rud. Geol. Naft. Zb.*, 2019, 34(4), 9–17.
- [6]. Abdelhaffez, G. S., Correlation Between Bond Work Index and Mechanical Properties of Some Saudi Ores, 2012, 40(1), 271–280.
- [7]. Swain, R., and Rao, R. B., Alternative Approaches for Determination of Bond Work Index on Soft and Friable Partially Laterised Khondalite Rocks of Bauxite Mine Waste Materials, *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, 2009, 8(9), 729–743.
- [8]. Deniz, V., Balta, G., and Yamık, A., The Interrelationships Between Bond Grindability of Coals and Impact Strength Index (I.S.I.), Point Load Index (I_s) and Friability Index (FD), *Chang. Scopes Miner. Process.*, 1996, 15–19.
- [9]. Su, O., *Kömürün Dayanım Özellikleri ile Öğütülebilirliği Arasındaki İlişkilerin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 2003, 100.
- [10]. Su, O., Toroğlu, İ., ve Akçin, N.A., *Kömür Öğütülebilirliği ile Dayanım ve İndeks Özellikleri Arasındaki İlişkiler*, Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildir Kitabı, 2004, 77–86.
- [11]. Su, O., Toroglu, İ., and Akçin, N. A., An Evaluation Of The Impact Strength Index As a Criterion of Grindability, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, 2010, 30 (17), 1671–1678.
- [12]. Tiryaki, B., Atasoy, K., Yaşıtlı, N. E., Eyüboğlu, A. S., and Aydın, M. Z., Studies in The Relationships Between Hardgrove Grindability and Some Rock Index Tests on Cayırhan Coals, *Proc. 20th Int. Min. Congr. Exhib. Turkey*, 2001, 451–458.
- [13]. Tiryaki, B., Practical Assessment of the Grindability of Coal Using Its Hardness Characteristics, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2005, 38 (2), 145–151.
- [14]. Deniz, V., and Umucu, Y., Interrelationships Between the Bond Grindability With Physicomechanical and Chemical Properties of Coals, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, 2013, 35 (2), 144–151.
- [15]. Deniz, V., and Ozdag, H., A New Approach to Bond Grindability and Work Index: Dynamic Elastic Parameters, *Miner. Eng.*, 2003, 16 (3), 211–217.
- [16]. Ozkahraman, H. T., A Meaningful Expression Between Bond Work Index , Grindability Index and Friability Value, 2005, 18, 1057–1059.
- [17]. Şengün, N., Umucu, Y., Altındağ, R., Deniz, V., Çayırılı, S., ve Oğuz, B., *Kayaçların Aşınma İndeks Değerlerinin Fiziko-Mekanik Özelliklerle Olan Etkileşimlerinin Değerlendirilmesi*, VIII. Bölgesel Kaya Mek. Sempozyumu, 2006, 8, 315–320.
- [18]. Kekec, B., Unal, M., and Şensogut, C., Effect Of The Textural Properties Of Rocks On Their Crushing And Grinding Features, *J. Univ. Sci. Technol. Beijing Miner. Metall. Mater. (Eng Ed)*, 2006, 13 (5), 385–392.

- [19]. Aras, A., Ozkan, A., and Aydogan, S., Correlations of Bond and Breakage Parameters of Some Ores with the Corresponding Point Load Index, Part. Part. Syst. Charact., 2012, 29, 204–210.
- [20]. Ram Chandar, K., Deo, S. N., and Baliga, A. J., Prediction of Bond's Work Index from Field Measurable Rock Properties, Int. J. Miner. Process., 2016, 157, 134–144.
- [21]. Kahraman, S., Ucurum, M., Yogurtcuoglu, E., and Fener, M., Evaluating the Grinding Process of Granitic Rocks Using the Physico-Mechanical and Mineralogical Properties, J. Met. Mater. Miner., 2019, 29(2), 51–57.
- [22]. Abdelhaffez, G. S., Studying the Effect of Ore Texture on the Bond Work Index at the Mahd Ad Dahab Gold Mine: A Case Study, Rud. Geol. Naft. Zb., 2020, 35 (1), 111–121.
- [23]. Aras, A., Özşen, H., and Dursun, A. E., Using Artificial Neural Networks for the Prediction of Bond Work Index from Rock Mechanics Properties, Miner. Process. Extr. Metall. Rev., 2020, 41 (3), 145–152.
- [24]. Mucsi, G., Fast Test Method for the Determination of the Grindability of Fine Materials, Chem. Eng. Res. Des., 2008, 86(4), 395–400.
- [25]. ISRM, The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006, 2007.
- [26]. ISRM, The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014, 2014.
- [27]. Dahl, F., DRI, BWI, CLI standards, NTNU, 2003, 20.
- [28]. Yaralı, O., Akçin, N. A., ve Bacak, G., Mekanik Kazıda Kayaçların Petrografik Özellikleri ile Delinebilirlik ve Aşındırıcılık Özellikleri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi Proje No : 104M437, TUBİTAK Araştırma Projesi Sonuç Raporu, 104M437, Zo., 2008, 140.
- [29]. Aldı, Ç., Kayaçların Delinebilirliğine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [30]. Sakız, U., Kayaç Delinebilirliğinin ve Mekanik Özelliklerinin Spesifik Delme Enerjisine Olan Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018, 181.
- [31]. ASTM, Standard Test Method for the Hardgrove Grindability Index (HGI) of Petroleum Coke, Des. D5003 – 19, 1993.
- [32]. Bond, F. C., The third theory of comminution, Trans. AIME Min. Eng., 1952, 193, 484–494.
- [33]. Gharegheshlagh, H. H., Cebeci, A. T., ve Ergün, L. Ş., Laboratuvar Çalışmaları Sonuçları ve Benzetim (Simülasyon) Yöntemi Kullanılarak Altın Cevheri Öğütme Devreleri ile İlgili Seçeneklerin Değerlendirilmesi; Örnek Olay İncelemesi: İran Gold Co., Maden Tetk. ve Aram. Derg., 2019, 159, 223–238.
- [34]. Tichánek, F., Contribution to Determination of Coal Grindability Using Hardgrove Method Příspěvek Ke Stanovení Melitelnosti Uhlí Metodou, 2008, LIV(1), 27–32.
- [35]. Bond, F. C., Crushing and Grinding Calculations, CIM Bull., 1954, 47(507), 466–472.
- [36]. Bond, F. C., Crushing and Grinding Calculations I-II, Br. Chem. Eng., 1961, 1–14.
- [37]. Haese, U., Scheffler, P., and Fasbender, H., Zement-Kalk-Gips, 1975, 8, 316–324.
- [38]. McIntyre, L., and Plitt, A., The Interrelation Between Bond And Hardgrove Grindabilities, CIM Bulletin, 1980, 73 (818), 149–154.
- [39]. Hower, J. C., Barron, L. S., and Moshier, S. O., Application of the Hardgrove Grindability Index in Carbonate Characterization, Miner. Metall. Process., 1992, 9(3), 146–150.
- [40]. Csoke, B., Hatvani, Z., Papanastassiou, D., and Solymár, K., Investigation of Grindability of Diasporic Bauxites in Dry, Aqueous and Alkaline Media as well as After High Pressure Crushing, Int. J. Miner. Process., 2004, 74.
- [41]. Rattanakawin, C., and Tin, A. L., Hardgrove Grindability Index and Approximate Work Index of Sodium Feldspar, Songklanakarın J. Sci. Technol., 2019, 41 (3), 664–668.
- [42]. Özer, Ü., ve Çabuk, E., Bond İş İndeksi ve Kaya Parametreleri Arasındaki İlişki, 2006, 1, 43–49.