



DOĞAL YAPI TAŞLARININ FİZİKO MEKANİK ÖZELLİKLERİYLE BÖHME AŞINMA DİRENCİNİN TAHMİNİ

ALİ BOZDAĞ*

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Böhme Aşınma Direnci,
Doğal Yapı Taşı,
Fiziko-Mekanik Özellikler,
Basit Regresyon,
Çoklu Regresyon.*

Öz

Dünya nüfusunun artmasına bağlı olarak yapı sektöründe doğal yapı taşlarına olan talep her geçen gün artmakta olup doğal taşların kullanım alanlarının doğru tespit edilebilmesi için fiziko-mekanik özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi doğal taşların kullanım alanlarındaki davranışlarının da anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Doğal taşların kullanım alanlarına göre belirlenmesi gereken mekanik özelliklerden birini oluşturan aşınma direncinin tespiti için yaygın olarak kullanılan yöntem Böhme aşınma testidir. Bu çalışma da farklı kökenli kayaların (magmatik, metamorfik, sedimentar) fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesiyle aşınmaya karşı dayanım dirençlerinin tahmini istatistiksel yöntemlerle incelendi. Bu amaçla Anadolu'nun farklı bölgelerinden farklı kökenli doğal taş örnekleri toplanmış ve bu örneklerde Böhme aşınma deneyi ve fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Doğal taşların Böhme aşınma direnci ile kuru yoğunluk, porozite, ağırlıkça su emme, P dalga hızı, Schmidt çekiç değeri, tek eksenli basma değerleri arasındaki ilişkiler basit regresyon ve çoklu regresyon analizleriyle incelenmiştir. Çoklu regresyon analiziyle geliştirilen denklem yardımıyla belirlenen Böhme aşınma direnç değerleri ile deneysel yöntemlerle belirlenen Böhme aşınma direnç değerleri arasında $R^2=0,92$ olarak belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma ile farklı doğal taşların aşınma direncinin tahmininde Böhme aşınma testinden farklı olarak diğer fiziko-mekanik özelliklerden elde edilebilecek denklemler geliştirilmiştir.

ESTIMATION OF BOHME ABRASION RESISTANCE THROUGH THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF NATURAL BUILDING STONES

Keywords

*Böhme Abrasion Resistance,
Natural Building Stone,
Physico-Mechanical
Properties,
Simple Regression,
Multiple Regression.*

Abstract

Due to the increase in the world population, the demand for natural building stones in the building sector is increasing day by day, and it is necessary to determine the physico-mechanical properties of natural stones in order to accurately determine the usage areas. In addition, determining the physico-mechanical properties is important in terms of understanding the behavior of natural stones in their usage areas. The commonly used method for determining the abrasion resistance, which constitutes one of the mechanical properties that should be determined according to usage areas, is the Böhme abrasion resistance test. In this study, by determining the physico-mechanical properties of rocks having the different origin (igneous, metamorphic, sedimentary), the strength resistance to the abrasion resistance of the rocks was investigated by statistical methods. For this purpose, natural stone samples with different origin were collected from different regions of Anatolia, and physico-mechanical experiments and the Böhme abrasion resistance tests were carried out. Relationships between Böhme abrasion resistance and dry density, porosity, water absorption by weight, P-wave velocity, Schmidt hammer value, uniaxial compressive strength values of natural stones were investigated with simple regression and multiple regression analysis. A high positive correlation ($R^2=0.92$) was determined between the Böhme abrasion resistance values determined by the equation obtained from multiple regression analysis and the Böhme abrasion resistance values determined by experimental methods. With this study, equations that can be obtained from other physico-mechanical properties,

* İlgili yazar / Corresponding author: abozdag@ktun.edu.tr, +90-332-205-1959

different from the Böhme abrasion resistance test, were developed for the estimation of the abrasion resistance of different natural stones.

Alıntı / Cite

Bozdağ, A., (2020). Doğal Yapı Taşlarının Fiziko Mekanik Özellikleriyle Böhme Aşınma Direncinin Tahmini, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1062-1071.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A.Bozdağ, 0000-0003-2590-8798

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	20.07.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	30.09.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.10.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

1. Giriş (Introduction)

Doğal taşların mühendislik yapılarında kullanılmadan önce, aşınma davranışının o mühendislik yapısı için uygun olup olmadığına karar verilmesinde, aşınma direncinin tespit edilmesi son derece önem arz etmektedir. Kullanılan farklı türdeki doğal taşların aşınma dirençleri de farklılıklar göstermektedir. Doğal taşların aşınma dirençlerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan standart, EN 14157 (2004) olup, bu standartta özellikle döşeme taşı olarak kullanılacak doğal taşların aşınmaya karşı dirençlerinin belirlenmesinde 3 farklı yöntem önerilmektedir. Bunlar, Wide Wheel, Böhme ve Amsler aşınma yöntemleridir. Standartta özellikle son yıllarda yeni yeni kullanılmaya başlanan Wide Wheel yönteminin referans yöntem olarak kullanıldığı belirtilir. Böhme aşınma yöntemi ise uzun yıllardır en yaygın şekilde kullanılan yöntemdir.

Doğal taşların fiziko-mekanik özellikleriyle aşınma dirençleri arasındaki ilişki birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (MacGrego ve Chiu, 2000; Kahraman ve Günaydın, 2007; Kahraman ve Fener, 2008; Yavuz vd., 2008; Çobanoğlu ve Çelik, 2010, 2017; Çelik vd., 2014; Kahraman ve Kılıç, 2017; Ureel ve Momaye, 2017; Aksoy, 2018; Çelik, 2018; Strzałkowski vd., 2020). Doğal taşların kullanım alanlarının doğru tespit edilmesinde oldukça büyük öneme sahip olan ve 1950'li yıllarda geliştirilen (Karaca vd., 2012) Böhme aşınma direncinin belirlenmesine yönelik birçok farklı çalışma mevcuttur. Gökçe (2014), travertenlerin tabakalanmaya paralel ve dik yöndeki Böhme aşınma direnci değerlerini araştırmış ve aşınma yüzeyindeki boşluk alan oranı ile Böhme aşınma direnci değeri arasında doğrusal ilişkinin olduğunu belirlemiştir. Karaca vd., (2010) ve Çobanoğlu ve Çelik (2010), karbonatlı kayalarda Böhme ve Geniş Disk aşınma değerlerinin donma-çözünme çevrimlerine bağlı olarak değişimini araştırmıştır. İnce (2013) ise farklı kayaç türlerinin farklı donma-çözünme çevrimleri ile Böhme aşınma direnci arasındaki değişimi belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapmış ve donma çözünme döngülerinin artmasıyla Böhme aşınma kaybının arttığını belirlemiştir. Mohammed (2018) kayaçların temel indeks özellikleri ile Böhme aşınma kaybı arasında oldukça yüksek korelasyon katsayıları belirlemişlerdir. Bozdağ (2013) ise farklı kayaç grupları (sedimanter, mağmatik ve metamorfik) üzerinde tuz kristallenmesi deneyleri yaparak kayaçların Böhme aşınma dirençlerindeki değişimleri araştırmıştır. Yavuz vd., (2005) mermerlerin tane boyutu, Shore sertlikleri ve nokta yük indeksi ile aşınma değerleri arasında anlamlı ilişkiler bulmuşlardır. Gökten ve Emir (1996) yaptıkları çalışmada Böhme aşınma direnci ile Rockwell sertlikleri arasındaki ilişkiyi inceleyerek anlamlı korelasyonlar bulmuşlardır.

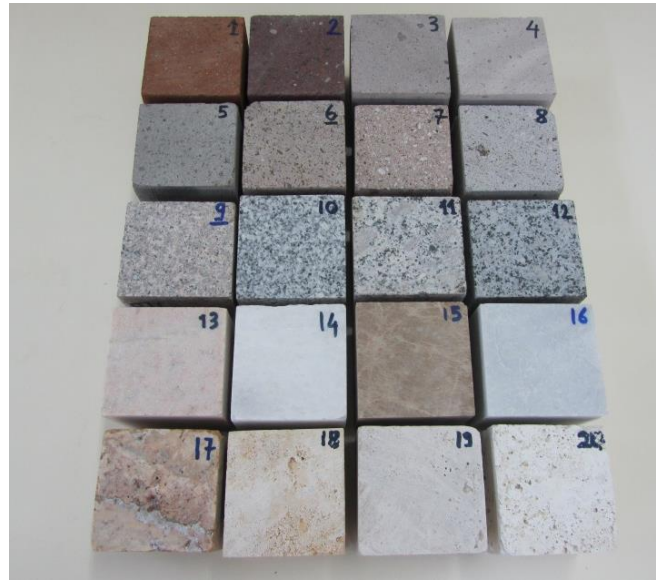
Özellikle son yıllarda hızla gelişmekte olan dünyada arz-talep döngüsünün sürdürülebilir dengesi her alanda olduğu gibi doğal yapıtaş sektöründe de en önemli konulardan birisidir. Doğal taşların fiziko- mekanik özelliklerinin belirlenmesi kullanım alanlarının doğru seçilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Böhme aşınma direnci testi ise, aşınma direncini belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Fakat gerek dünyada gerekse Türkiye'de yaygın olarak uygulanan Böhme aşınma direnci testi oldukça zahmetlidir. Bu deneysel çalışma kapsamında, 20 farklı ocaktan alınan doğal taşların aşınmaya karşı direncini tahmin etmek amacıyla kayacın fiziko-mekanik özellikleri (kuru yoğunluk, porozite, ağırlıkça su emme, P dalga hızı, Schmidt çekiç değeri ve tek eksenli basma değerleri) ve Böhme aşınma direnci arasındaki ilişkiler basit ve çoklu regresyon analizleri ile araştırılmıştır. Böylece, doğal yapı taşlarının fiziko-mekanik değerlerinden yararlanılarak elde edilen eşitliklerden Böhme aşınma dirençlerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada farklı kökenli Türkiye'nin farklı şehirlerindeki (Bitlis, Nevşehir, Kayseri, Aksaray, Afyonkarahisar, Eskişehir, Ankara, Çankırı, Erzurum, Çanakkale, Kırıkkale, Adıyaman, Karaman ve Konya) ocaklardan toplam 20 adet doğal taş örneği toplanmış olup örnekler 7*7*7 cm boyutlarında küp haline getirilmiştir. (Şekil 1, 2).



Şekil 1. Çalışmada kullanılan örneklere ait lokasyon haritası (Location map of the samples used in the study)



Şekil 2. Çalışmada kullanılan örnekler (Samples used in the study)

Toplanan doğal taşların mineralojik bileşimini belirlemek için her bir örnekten TS EN 12407 (2002) belirtilen hususlara göre ince kesit hazırlanmış ve optik mikroskop altında incelenmiştir (Tablo 1). Örneklerin fiziksel özellikleri (kuru yoğunluğu, porozite, ağırlıkça su emme) ve tek eksenli sıkışma dayanımları EN 1936 (2006), EN 13755 (2008) ve EN 1926 (2006) standartlarında belirtilen özelliklere göre yapılmıştır. Doğal taşların en önemli mekanik parametrelerinden birisi olan tek eksenli sıkışma dayanım değerini belirlemek için 2000 kN kapasiteli pres kullanılmış ve numuneye sabit bir gerilme hızında $1 \pm 0,5$ MPa/s yük uygulanmıştır. Schmidt çekici değeri ve P-dalga hızları sırasıyla, ASTM D5873 (2014) ASTM E494 (2010) standartlarında önerilen esaslara göre yapılmıştır. Schmidt çekici değeri deneyinde L tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. P-dalga hız değerleri ise 54 kHz band genişliğinde, alıcı ve verici dönüştürücülere sahip Proceq marka Pundit Lab Plus test cihazıyla, örneklerin paralel, düz ve pürüzsüz yüzeylerinde direkt ölçüm yöntemiyle ölçülmüştür. Böhme aşınma direnci (BAD) deneyi ise EN 14157 (2004)'de önerilen yöntemlere uygun olarak belirlenmiştir.

BAD değerini belirlemek amacıyla ilk olarak kuru kütlesi (mi) belirli olan bir numune Böhme aşınma cihazı üzerinde bulunan hücreye yerleştirilmiş ve cihaz üzerinde bulunan sürtünme şeridine yaklaşık $20 \pm 0,5$ gr aşındırma tozu uygun biçimde serpilmiştir. Ayrıca cihaza, numunenin temas ettiği yüzeye yaklaşık 294 ± 3 N yük gelecek şekilde ağırlık uygulanmıştır. Daha sonra Böhme cihazı çalıştırılmıştır. Cihaz çalışırken döner disk 22 kez devir atar ve böylece 1 döngü tamamlanmış olur. Her döngüden sonra, temas bölgesi temizlenmiş ve numune 90° döndürülmüştür. Bu şekilde birbirini takip eden işlemler 16 kez tekrarlanmış ve sonra numunenin kütlesi (mf) tekrar belirlenerek deney sonuçlandırılmıştır. Aşağıdaki eşitlik 1'den yararlanarak numune hacmindeki azalma tespit edilmiştir.

$$BAD = \frac{mi-mf}{\rho_d} \quad (1)$$

BAD= Böhme aşınma direnci, cm³/50cm²

mi= İlk kuru kütle, gr

mf= Son kuru kütle, gr

ρ_d =Kuru yoğunluk gr/cm³

Tablo 1. Doğal taş örneklerinin alındığı bölge, rengi, mineral bileşimi ve petrografik tanımlaması (The region where the natural stone samples were taken, and color, mineral composition and petrographic identification of the natural stone samples)

No	Bölge	Renk	Mineral Bileşimi	Kayaç Adı	Kayaç Tipi
1	Ahlat/ Bitlis	Kahverengi	V,Pl,Kp,P,K,Op	Tüf	Mağmatik (Piroklastik)
2	Nevşehir	Bordo	V,Pl,Kp,P,Op	Tüf	Mağmatik (Piroklastik)
3	Kayseri	Gri	V,Pl,B,H,P,Op	Tüf	Mağmatik (Piroklastik)
4	Gülşehir/ Aksaray	Gri	V,P,B,Op	Tüf	Mağmatik (Piroklastik)
5	İşcehisar/ Afyonkarahisar	Gri	Pl,P,B,Op	Andezit	Mağmatik (Volkanik)
6	Sivrihisar/ Eskişehir	Pembe	Pl,P,H,Op	Andezit	Mağmatik (Volkanik)
7	Sincan/ Ankara	Pembe	Pl,V,H,B,Op	Andezit	Mağmatik (Volkanik)
8	Çankırı	Gri	Pl,H,B,K,A,Op	Andezit	Mağmatik (Volkanik)
9	İspir/Erzurum	Pembe	Pl,O,K,H,Op	Granit	Mağmatik (Derinlik)
10	Çanakale	Gri	Pl,O,B,H,K,Op	Granit	Mağmatik (Derinlik)
11	Ulaş/Kırıkkale	Gülkurusu	K,Pl,H,O,S,Z,Op	Granit	Mağmatik (Derinlik)
12	Keskin/ Kırıkkale	Gri-yeşil	Pl,H,K,O,B,S,Z,Op	Granit	Mağmatik (Derinlik)
13	Afyonkarahisar	Açık Pembe	D,Ka	Mermer	Metamorfik
14	Afyonkarahisar	Beyaz	Ka,D	Mermer	Metamorfik
15	Adıyaman	Açık Kahve	Ka,D	Mermer	Metamorfik
16	Yunak/Konya	Açık Gri	D	Dolomit	Metamorfik
17	Seydişehir/Konya	Kahve-sarı	Ka	Traverten	Sedimanter
18	Karaman	Kirli Sarı	Ka	Traverten	Sedimanter
19	Polatlı/ Ankara	Kirli Beyaz	Ka	Traverten	Sedimanter
20	Ereğli/ Konya	Beyaz	Ka	Traverten	Sedimanter

V: Volkanik cam, Pl: Plajiyoklas, Kp:Kayaç parçası, P: Proksen, K: Kuvars, B: Biyotit, H: Hornblend, Op: Opak mineral, A: Apatit, S: Sfen, Z: Zirkon, O: Ortoklas, D: Dolomit, Ka: Kalsit.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Çalışmada kullanılan mağmatik (piroklastik, volkanik, derinlik), metamorfik ve sedimanter kayaçların Böhme aşınma direnci ve fiziko-mekanik (kuru yoğunluk, porozite, ağırlıkça su emme, P-dalga hızı, tek eksenli sıkışma dayanımı, Schmidt çekici) değerleri ile bu verilere ait istatistiksel sonuçları Tablo 2'de verilmektedir.

3.1. Doğal taşların fiziksel özellikleri (Physical properties of natural stones)

3.1.1. Kuru yoğunluk (ρ_d), Porozite (n) ve Ağırlıkça su emme (Wa) testleri (Dry density, porosity and water absorption by weight tests)

Doğal taşlardan elde edilen kübik numunelerde standartlarına uygun olarak, kuru yoğunluk, porozite ve ağırlıkça su emme değerleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan doğal taşların temel fiziksel özelliklerinden kuru yoğunluk değerleri 1,41-2,81 gr/cm³ arasında değişirken, Porozite değerleri ise % 0,70 ile % 34,51 arasında ve ağırlıkça su emme değerleri ise % 0,27 ile % 24,43 arasında değişim göstermektedir (Tablo 2). NBG (1985) kuru yoğunluk sınıflamasına göre doğal taşlar çok düşük ile yüksek yoğunluklu kaya sınıfı arasında değişmektedir. NBG (1985) sınıflamasına göre örneklerin porozite değerleri; 1 nolu örnek çok yüksek, 2-8 nolu örnek yüksek, 9-16 nolu örnek düşük, 17-19 nolu örnek orta ve 20 nolu örnek yüksek sınıfta yer almaktadır.

Tablo 2. Doğal taş örneklerinin fiziko-mekanik özellikleri (ρ_d : Kuru yoğunluk, n : porozite, W_a : Ağırlıkça su emme, V_p : P-dalga hızı, TSD : Tek eksenli sıkışma dayanımı, $S\check{C}D$: Schmidt çekici değeri, BAD : Böhme aşınma direnci) (Physico-mechanical properties of natural stone samples (ρ_d : Dry density, n : porosity, W_a : Water absorption by weight, V_p : P-wave velocity, TSD : Uniaxial compressive strength, $S\check{C}D$: Schmidt hammer value, BAD : Böhme abrasion resistance))

Numune No	Test sayısı	ρ_d gr/cm ³	n %	W_a %	V_p km/s	$S\check{C}D$	TSD MPa	BAD cm ³ /50cm ²
1	7	1,41	34,51	24,43	2,13	15	10,50	35,11
2	7	1,83	18,63	10,15	3,14	26	40,63	13,03
3	7	2,06	12,14	5,88	3,80	40	83,39	7,10
4	7	1,85	19,08	10,29	3,36	33	75,16	8,90
5	7	2,14	11,41	5,34	4,01	36	67,20	15,51
6	7	2,27	7,84	3,45	4,81	38	70,22	6,76
7	7	2,21	8,93	4,04	3,78	40	75,40	5,78
8	7	2,22	10,81	4,88	3,71	42	92,12	10,84
9	7	2,60	1,43	0,55	4,70	54	170,02	1,88
10	7	2,63	0,94	0,36	5,21	53	158,55	1,62
11	7	2,70	1,56	0,58	4,37	51	140,43	2,38
12	7	2,66	1,04	0,39	4,78	54	188,13	2,03
13	7	2,81	1,12	0,40	3,55	44	126,18	8,64
14	7	2,68	0,82	0,31	3,89	34	72,80	13,40
15	7	2,66	1,14	0,43	6,03	42	98,20	7,40
16	7	2,61	0,70	0,27	5,82	40	78,57	12,04
17	7	2,48	3,18	1,28	3,29	36	54,11	18,70
18	7	2,37	3,74	1,58	3,90	34	37,21	16,67
19	7	2,46	2,13	0,87	3,02	34	34,30	17,46
20	7	1,94	10,53	5,43	2,03	16	13,24	28,52
Minumum		1,41	0,70	0,27	2,03	15,00	10,50	1,62
Maksimum		2,81	34,51	24,43	6,03	54,00	188,13	35,11
Ortalama		2,33	7,58	4,04	3,97	38,10	84,32	11,69
S. Sapma		0,37	8,70	5,76	1,05	10,82	50,08	8,74

3.1.2. P-dalga hızı (V_p) testi (P-wave velocity test)

Tahribatsız bir test yöntemi olan V_p testi hem laboratuvarında hem de sahada uygulanabilir. V_p testleri pratik ve ekonomik olmasından dolayı doğal taşların mekanik özelliklerinin tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada doğal taşların aşınma değerleri ile ilişkisini ortaya çıkarmak amacıyla V_p değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonucunda elde edilen P dalga hızı en düşük 2.03 km/s ile 20 nolu traverten örneğinde, en yüksek ise 6.03 km/s ile 15 nolu mermer örneğinde ölçülmüştür (Tablo 2).

3.1.3. Schmidt çekici değeri ($S\check{C}D$) testi (Schmidt hammer value test)

Schmidt çekici doğal taşların yüzey sertliklerinin hasarsız ve pratik olarak hem arazide hem de laboratuvarında belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışılan örneklerin yüzey sertlikleriyle ve aşınma dirençleri arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için Schmidt çekici testi yapılmıştır. Elde edilen verilere göre örneklerin $S\check{C}D$ 15-54 arasında değişmektedir (Tablo 2). ISRM (1978) $S\check{C}D$ sertlik sınıflamasına göre; magmatik kayalar az yumuşak-oldukça sert, metamorfik kayalar az sert-sert, sedimanter kayalar ise az yumuşak-az sert sınıfındadır.

3.2. Doğal taşların mekanik özellikleri (Mechanical properties of natural stones)

3.2.1. Tek eksenli sıkışma dayanım (TSD) testi (Uniaxial compressive strength test)

Yapılan deneylerden elde edilen verilere göre çalışmada kullanılan örneklerin TSD değerleri 10,50-188,13 MPa arasında değişmektedir (Tablo 2). Kayalar ISRM (1979) sınıflamasına göre; 1 ve 20 nolu örnekler düşük dayanımlı, 2,18 ve 19 nolu örnekler orta-düşük dayanımlı, 3-8 ve 14-17 nolu örnekler orta dayanımlı ve 9-13 nolu örnekler ise yüksek dayanımlı sınıfına girmektedir.

3.2.2. Böhme aşınma direnci (BAD) testi (Böhme abrasion resistance test)

Standartta önerilen yöntemlere uygun olarak yapılan Böhme aşınma direnci (BAD) deneyi sonuçlarına göre, çalışılan doğal taşların BAD değerleri 1,62 ile 35,11 cm³/50cm² arasında değişmektedir (Tablo 2). Aşınma değerleri incelendiğinde, en yüksek aşınma direnç değeri piroklastik kayalardan 1 nolu örnekte bulunmuştur. En düşük aşınma direnç değeri ise derinlik kayalardan 10 nolu örnekte tespit edilmiştir.

4. Deney Verilerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Test Data)

4.1. Doğal taşların fiziko-mekanik özellikleri ile Böhme aşınma direnci arasındaki ilişkilerin istatistiksel yöntemlerle araştırılması (Investigation of the relationship between physico-mechanical properties of natural stones and Böhme abrasion resistance by statistical methods)

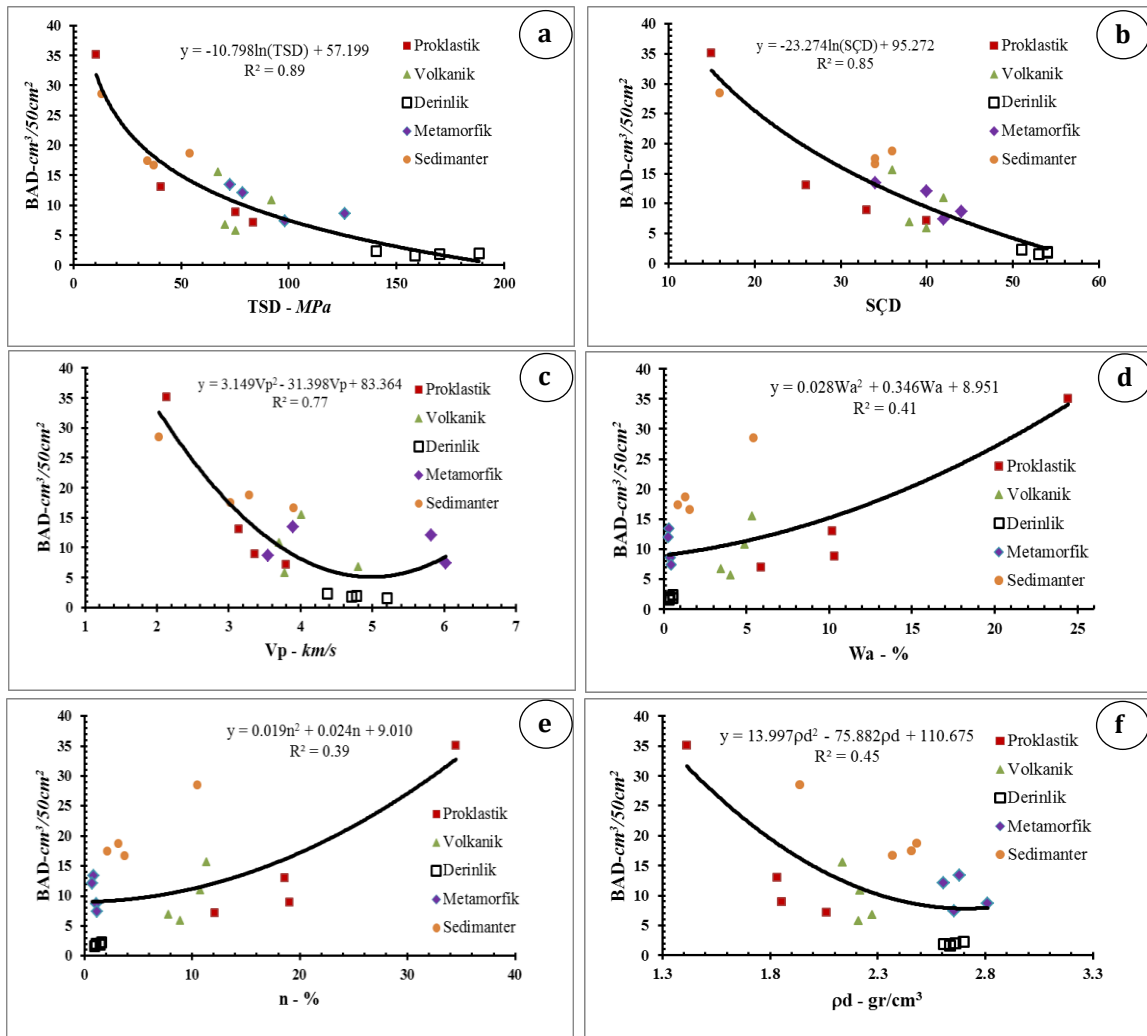
Doğal taşların Böhme aşınma direnç değerleri ile fiziko-mekanik özellikleri (ρ_d , n, Wa, Vp, SÇD, TSD) arasındaki ilişkileri modellemek için SPSS-21 programı yardımıyla basit ve çoklu regresyon analizleri yapılmış ve çeşitli eşitlikler üretilmiştir.

4.1.1. Basit regresyon analizi (BRA) (Simple regression analysis)

Doğal taşların kuru yoğunluk, porozite, ağırlıkça su emme, P-dalga hızı, Schmidt çekici değeri, Tek eksenli sıkışma dayanımı ile Böhme aşınma direnç değerleri arasındaki ilişkileri modellemek için basit regresyon analizinden yararlanılmıştır. BRA vasıtasıyla doğal taşların BAD değerleri ile fiziko-mekanik değerleri arasındaki ilişkiler doğrusal, üs, üstel, logaritmik ve polinomsal fonksiyonlar kullanılarak incelenmiş ve en yüksek korelasyona sahip denklemler Şekil 3'de verilmiştir. Doğal taşların fiziko-mekanik özellikleri ile Böhme aşınma değerleri arasındaki en iyi ilişkiyi gösteren denklemlere ait korelasyon katsayıları 0,39 ile 0,89 arasında değişmektedir. BAD değeri ile ρ_d arasında R² değeri 0,45 olan negatif polinomsal eğilim türü gözlenmiştir. Doğal taşların n ve Wa değerlerinin artmasıyla BAD değerinin arttığı belirlenmiştir. BAD değeri ile n ve Wa arasında R² değerleri sırasıyla 0,39 ve 0,41 olan pozitif polinomsal eğilim türü gözlenmiştir.

İncelenen örneklerin TSD, SÇD, Vp değerleri ile BAD değerleri arasında yüksek negatif ilişki bulunmaktadır. BAD değerleri ile TSD, SÇD, Vp değerleri arasındaki eğilim türü sırasıyla logaritmik, logaritmik ve polinomsal olup, R² değerleri ise sırasıyla 0,89, 0,85 ve 0,77 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada basit regresyon analiziyle BAD değerlerini tahmin etmek için geliştirilen denklemlerin geçerliliğini incelemek için % 95 güven aralığı seçilmiş olup F ve t testleri aracılığıyla kullanılabilirliği kontrol edilmiştir (Tablo 3). Ayrıca çalışmada kullanılan 20 farklı doğal taşın örnek kitlesi için tablo F değeri 4,38 ve tablo t-değeri 1,73 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. BAD ile fiziko-mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler (Graphs showing the relationship between BAD and physico-mechanical properties) a) BAD-TSD; b) BAD-SÇD; c) BAD-Vp; d) BAD-Wa; e) BAD-n; f) BAD- ρ_d

Tablo 3. BAD değerlerini tahmin edebilmek için BRA ile türetilen denklemler ve varyans analizi (BRA-derived equations and variance analysis to estimate BAD values)

Değişken	Geliştirilen Eşitlik	R ²	F test	P<0,05	t test	P<0,05
TSD	BAD = 57,199-10,798lnTSD	0,894	151,282	0,000	-12,300	0,000
SÇD	BAD = 95,272-23,274lnSÇD	0,846	99,240	0,000	-9,962	0,000
Vp	BAD = 83,364+3,149Vp ² -31,398Vp	0,774	29,038	0,000	-5,358	0,000
Wa	BAD = 8,951+0,028Wa ² +0,346Wa	0,414	6,015	0,011	0,817	0,425
n	BAD = 9,010+0,019n ² +0,024n	0,389	5,421	0,015	1,166	0,260
ρ _d	BAD = 110,675+13,997ρ _d ² -75,882ρ _d	0,446	6,852	0,007	-1,659	0,115

BRA ile elde edilen varyans sonuçları incelendiğinde TSD, SÇD, Vp, Wa, n ve ρ_d özelliklerine göre geliştirilen eşitliklerden hesaplanan F testine ait p değerinin önem katsayısı (α) 0,05 değerinden küçük olduğu görülmüştür. Fiziko-mekanik özelliklere göre geliştirilen eşitliklerden hesaplanan F değerleri tablo F değerinden büyüktür. Ayrıca TSD, SÇD ve Vp ait eşitliklerden elde edilen t testine ait p değerinin önem katsayısı ise (α) 0,05 değerinden küçük iken, diğer eşitliklere ait p değerinin önem katsayısı (α) 0,05 değerinden büyüktür. TSD, SÇD ve Vp değerlerine ait eşitliklerden hesaplanan t değerleri, tablo t den büyük iken, Wa, n ve ρ_d değerlerine ait eşitliklerden hesaplanan t değerleri, tablo t den küçük olduğu bulunmuştur. Eşitliklerden hesaplanan p değeri önem katsayısı (α) 0,05 üstünde olan denklemler tahmin amaçlı kullanılamazken önem katsayısı (α) 0,05 altında olan eşitlikler tahmin amaçlı kullanılabilir. Tahmin amaçlı kullanılacak denklemlerdeki verilerin elde edilme imkanları (zaman ve maliyet bakımından, tekrarlanma ve örselenme durumları, laboratuvar ve arazi koşullarında yapılması vb.) birbirinden farklıdır. Geliştirilen denklemlerdeki verilerin elde edilme imkanlarının birbirinden farklı olması, araştırmacıya belirlenecek değeri elde edebilme imkanına göre seçenek oluşturması açısından oldukça önemlidir. Yapılan basit regresyon analizlerinde geliştirilen denklemlerin tek bağımsız değişkene göre oluşturulması, denklemin daha pratik ve hızlı olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

4.1.2. Çoklu regresyon analizi (ÇRA) (Multiple regression analysis)

Doğal taşların BAD değerinin tahmin etmek için bağımsız değişkenler (ρ_d , n, Wa, Vp, SÇD, TSD) kullanılmış ve % 95 güven aralığında çoklu regresyon analiziyle incelenmiştir. Seçilen bağımsız değişkenler kullanılarak BAD değerlerinin tahmini için 57 farklı alt kümeden oluşan eşitlikler geliştirilmiştir ve belirleme katsayıları bulunmuştur. ÇRA ile BAD değerlerini tahmin etmek için geliştirilen en iyi alt kümeye ait eşitliğin geçerliliği varyans analiziyle kontrol edilmiştir. Çoklu regresyon analiziyle elde edilen en iyi alt kümeye ait denklemin istatistiksel sonuçları ve regresyon modelin varyans analizi değerleri Tablo 4 ve 5’de verilmiştir. Yapılan varyans analizi ile geliştirilen eşitliklerin geçerliliğinin kontrolü için, p değerinin 0.05 den küçük olması şartı aranmıştır. BAD değerinin tahmini için, geliştirilen eşitlikler içerisinde % 5 önem düzeyi şartını sağlayan ve kuvvetli korelasyona sahip denklemin kullanımı tercih edilebilir.

Bu çalışmada kullanımı tercih edilecek en iyi alt kümeye sahip denklem, TSD, SÇD, Vp, Wa, n ve ρ_d ile temsil edilen bağımsız değişkenleri içermekte olup denklemin yüksek korelasyon katsayısına ($R^2= 0,917$) sahip olduğu bulunmuştur. Denklem Eşitlik 2’de verilmektedir.

$$\text{BAD} = 57.092 - 0.046\text{TSD} - 0.396\text{SÇD} - 1.719\text{Vp} + 3.071\text{Wa} - 2.288\text{n} - 6.286\rho_d \quad (2)$$

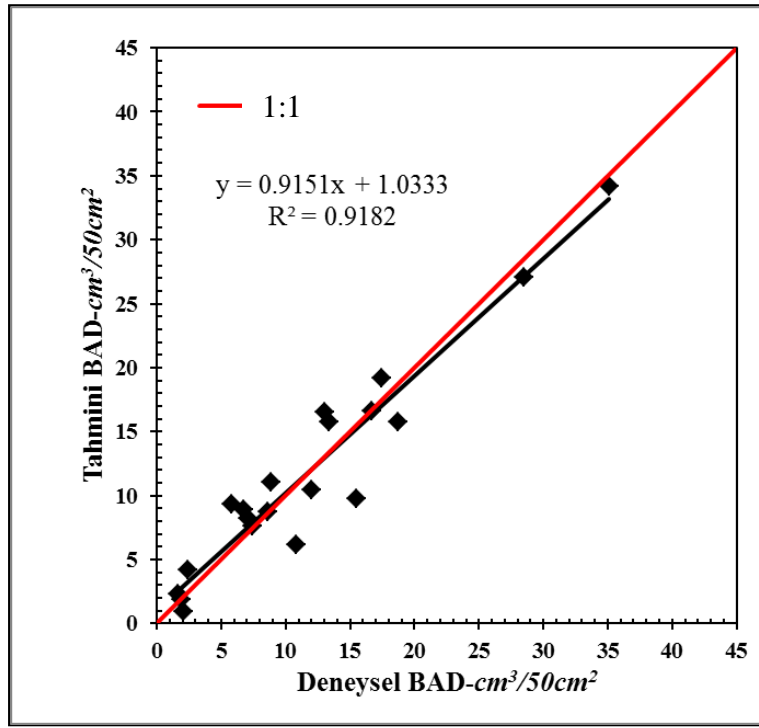
Tablo 4. Çoklu regresyon analizinden elde edilen en iyi alt kümeye ait denklemin istatistiksel sonuçları (Statistical results of the equation for the best subset obtained from multiple regression analysis)

	Standartlaşmamış Katsayılar		Standart Katsayılar	t	p
	β	Std. Hata	Beta		
Sabit Katsayı	57.092	25.379		2.250	0.042
TSD	-0.046	0.043	-0.266	-1.076	0.302
SÇD	-0.396	0.253	-0.490	-1.567	0.141
Vp	-1.719	1.021	-0.207	-1.683	0.116
Wa	3.071	0.966	2.021	3.180	0.007
n	-2.288	0.901	-2.276	-2.540	0.025
ρ_d	-6.286	10.205	-0.266	-0.616	0,549

Tablo 5. Çoklu regresyon analizinden geliştirilen denklemin regresyon modelinin varyans analizi (Variance analysis of the regression model of the equation developed from multiple regression analysis)

Model	Kareler Toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler Ortalaması	F	p
Regresyon	1332,567	6	222,094	24,062	0.000
Kalan	119,993	13	9,230		
Toplam	1452,560	19			

Çoklu regresyon yöntemiyle en yüksek belirleme katsayısı ve en uygun önem düzeyine sahip denklemin güvenilirliğini test edebilmek amacıyla deneysel ve tahmin edilen BAD değeri aynı grafik üzerinde incelenmiştir (Şekil 4). Deneysel ve tahmin edilen BAD değerleri arasındaki korelasyon katsayısının (R^2) 0,9182 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca deneysel ve tahmin edilen BAD değerleri diyagramdaki 1:1 ($x=y$) doğrusu boyunca ve 1:1 doğrusunun alt ve üstünde yaklaşık yaklaşık eşit dağılım göstermiş olup bu durum uygulanan modelin güvenilirliğini göstermektedir.



Şekil 4. Deneysel ve tahmini BAD değerleri arasındaki ilişki (Relationship between experimental and predicted BAD values)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada Anadolu'nun farklı bölgelerinden derlenen tüf, andezit, granit, mermer, dolomit ve traverten gibi kayaç gruplarının Böhme aşınma ve fiziko-mekanik değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Doğal taşların fiziko-mekanik ve aşınma dirençleri arasında yapılan basit ve çoklu regresyon analizleri ile Böhme aşınma direnci değerinin farklı yöntemlerden elde edilen verilerle tahmini için denklemler türetilmiştir.

Çalışmada kullanılan Basit regresyon analiziyle Böhme aşınma direnci değerini tahmini için türetilen denklemlerden en iyi ilişkiyi logaritmik fonksiyonla Tek eksenli sıkışma dayanımı vermiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı ile Böhme aşınma dirençleri arasında negatif ilişki olup korelasyon katsayısı (R^2) 0,894 olarak belirlenmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı testi tekrarlanma, örselenme, zaman, zahmet ve sadece laboratuvarda yapılabilmesi açısından dezavantaj oluşturmaktadır. SÇD ve V_p testleri ise tekrarlanabilmeleri, örselenmemeleri, hızlı, pratik ve hem arazide hem de laboratuvarda uygulanabilmeleri açısından daha avantajlıdır. Basit regresyon analizi ile belirlenen SÇD ve BAD değeri arasındaki en iyi ilişki negatif olup logaritmik fonksiyonludur ve korelasyon katsayısı (R^2) 0,846 dır. BAD ile V_p değerleri arasında en iyi ilişki polinomsal fonksiyonlu ve azalan yönde eğilim göstermekte olup korelasyon katsayısı (R^2) 0,774 olarak bulunmuştur. Doğal taşların ρ_d , n , W_a değerleri ile BAD değerleri arasında ise anlamlı ilişkiler bulunamamıştır.

Ayrıca birçok farklı değişkenden faydalanabilmek ve daha yüksek korelasyon katsayısı elde edebilmek için çoklu regresyon analizi uygulanmıştır. Çoklu regresyon analiziyle Böhme aşınma direnci ve fiziko-mekanik özellikler arasında türetilen denklemler arasında daha yüksek korelasyon katsayısı değerlerine ulaşılmış olup en yüksek korelasyon katsayısı (R^2) 0,917 olarak belirlenmiştir. Ayrıca çoklu regresyon analizi ile türetilen denklemlerden en yüksek korelasyon değeri veren denklemde kullanılan bağımsız değişkenler TSD, SÇD, V_p , ρ_d , n ve W_a ile temsil edilmektedir.

Böhme aşınma direncini tahmin etmek için farklı değişkenlerle geliştirilen denklemlerindeki verilerin alternatifli olması, verilerin elde edilme imkanları açısından seçenek oluşturarak, araştırmacıya tercih imkanı sağlayacaktır. Bu çalışmada geliştirilen istatistiksel modellerden elde edilen veriler, benzer fiziko-mekanik özelliklere sahip doğal taşların Böhme aşınma direnci değerini tahmin etmede güvenilir olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan kayaç türleri ve farklı kayaç türlerinin Böhme aşınma değerini tahmin etmek için farklı istatistiksel programlarla da yaygın olarak kullanılabilir denklemler geliştirilebilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Aksoy, H.S., 2018. Kireçtaşlarının Aşınma Dirençlerinin Endeks Özellikleri Yardımıyla Belirlenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(1), 237-244.
- ASTM E494, 2010. Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials. Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 14 p.
- ASTM D5873, 2014. Standard test method for determination of rock hardness by rebound Hammer method. Annual book of ASTM standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 6 p.
- Bozdağ, A., 2013. Tuz (NaCl) Kristallenmesinin Kayaçların Mühendislik Parametreleri Üzerine Etkisi. Doktora Tezi. Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Çelik, S.B., Çobanoğlu, İ., Atatanır, L., 2014. General material properties of Denizli (SW Turkey) travertines as a building stone. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73, 825-838.
- Çelik, S.B., 2018. Karbonat Kayalarının Aşınma Dirençlerinin Geniş Disk Aşınma Deneyi ile Araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30 (1), 303-310.
- Çobanoğlu, İ., Çelik S.B., 2010. Correlation between wide wheel abrasion (capon) and Bohme abrasion test results for some carbonate rocks, Scientific Research and Essays, 5 (22), 3398-3404.
- Çobanoğlu, İ., Çelik, S.B., 2017. Assessments on the usability of Wide Wheel (Capon) test as reference abrasion test method for building stones. Construction and Building Materials, 151, 319-330.
- EN 14157, 2004. Natural stones – Determination of abrasion resistance, European Committee for Standardization, Brussels, 19 p.
- EN 1926, 2006. Natural stone test methods – Determination of uniaxial compressive strength. European Committee for Standardization, Brussels, 20 p.
- EN 1936, 2006. Natural stone test methods- Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. European Committee for Standardization, Brussels, 11 p.
- EN 13755, 2008. Natural stone test methods. Determination of water absorption at atmospheric pressure European Committee for Standardization, Brussels, 12 p.
- Gökçe, M.V., 2014. The effects of bedding directions on abrasion resistance in travertine rocks. Turkish Journal of Earth Sciences, 24, 196-207.
- Göktan, R.M., Emir, E., 1996. Rockwell sertlik deneyinin mermerlerde sürtünme ile aşınma dayanımı kestirimi amacıyla kullanılabilirliği. Türkiye'de Mermer Yapı Dekorasyon, 46, 16-20.
- ISRM, 1979. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16,135-140.
- ISRM, 1978. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 89-97.
- İnce, İ., 2013. Donma Çözülme Döngüsünün Kayaçların Mühendislik Parametreleri Üzerine Etkisi, Doktora Tezi. Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Kahraman, E., Kılıç A.M., 2017. Investigation of the Relationship between Böhme Abrasion Resistance and Strength Properties of Some Natural Stone. International Journal of Natural and Engineering Sciences, 11(2), 31-35.
- Kahraman, S., Günaydın O., 2007. Empirical methods to predict the abrasion resistance of rock aggregates. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, 449-455.
- Kahraman, S., Fener, M., 2008. Electrical resistivity measurements to predict abrasion resistance of rock aggregates. Bulletin of Materials Science, 31(2), 179-184.
- Karaca Z., Deliormanlı A.H., Elci H., Pamukcu Ç., 2010. Effect of freeze-thaw process on the abrasion loss value of Stones. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 47, 1207-1211.
- Karaca, Z., Günes Yılmaz N., Goktan R.M., 2012. Considerations on the European Standard EN 14157 Test Methods: Abrasion Resistance of Natural Stones used for Flooring in Buildings. Rock Mechanics and Rock Engineering, 45(1), 103-111.
- MacGregor I.D., Chiu K.Y., 2000. Porosity and wear resistance in stone flooring tiles. Journal of Testing and Evaluation, 28, 149-154.
- Mohammed, A.A.A., 2018. Yapıtaşlarının Temel İndeks özellikleri ve Elastik Parametreleri ile Böhme Aşınma Kaybı indeksleri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Ankara.
- NBG, 1985. Engineering Geology and Rock Engineering. Norwegian Group of Rock Mechanics, Fornebu, Norway, 249 p.
- Strzałkowski, P., Kaźmierczak, U., Wolny, M., 2020. Assessment of the method for abrasion resistance determination of sandstones on Böhme abrasion test apparatus. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01868-x>.
- TS EN 12407, 2002. Doğal taşlar- deney metotları- petrografik inceleme. Türk Standartları Enstitüsü yayınları, Ankara, 4 s.
- Ureel, S., Momayez, M., 2017. Simple Correlations between Rock Abrasion and Other significant Rock Properties for Rock Mass and Intact Quartzite. Open Journal of Civil Engineering, 7, 194-207.
- Yavuz, A.B., Turk, N., Koca, M.Y., 2005. Material properties of the Menderes massif marbles from SW Turkey. Engineering Geology, 82, 91-106.
- Yavuz, H., Uğur, İ., Demirdağ, S., 2008. Abrasion resistance of carbonate rocks used in dimension stone industry and correlations between abrasion and rock properties. Int Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45, 260-267.