



**T.C.
BİLECİK ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ SONUÇ RAPORU**

**BİLECİK İLİ DOĞAL TAŞ PERMEABİLİTE
DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ**

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ: Yrd. Doç. Dr. Murat Yurdakul

**ARAŞTIRMACILAR: Doç. Dr. Hürriyet Akdaş
Dr. Fatih Bektaş**

BAŞLAMA TARİHİ: 2011

BİTİŞ TARİHİ: 2013

**BİLECİK ÜNİVERSİTESİ
BİLECİK, 2013**

ÖZET

Doğal taşlar binlerce yıldır iç ve dış mekânlarda, yapı ya da kaplama taşı olarak farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Hangi amaçla kullanılırsa kullanılsın doğal taşların geçirgenlik değerlerinin bilinmesi, onların kullanım ömrünün ve kullanım yerinin doğru belirlenmesi için oldukça önemlidir. Bu çalışmada daha önce beton örneklerinin geçirgenlik değerlerinin belirlenmesi için kullanılan bir test metodu revize edilerek, doğal taş hava geçirgenlik değerlerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Bu amaçla yeni test düzeneği oluşturulmuş ve 5 grupta toplam 16 farklı doğal taş örneğine 96 farklı test yapılmıştır. Elde edilen hava geçirgenlik değerleri ile doğal taş örneklerinin ağırlıkça su emme, görünür yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri karşılaştırılmış ve kuvvetli korelasyon değerleri elde edilmiştir. Yeniden tasarımılandırılan test düzeneği ile 6 saat gibi kısa bir sürede doğal taş hava geçirgenliği ve dolayısıyla doğal taş gözenekliliği hakkında fikir edinmek mümkün olmaktadır. Sonuçlar göstermiştir ki hava geçirgenlik indeks değeri doğal yapı taşlarının geçirgenlik değerlerinin belirlenmesinde, görece ucuz ve hızlı bir metot olarak başarı ile kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Doğal taş, durabilite, hava geçirgenliği, mermer.

ABSTRACT

Natural stones have been widely used in architectural structures as structural and/or facing elements. Natural stones that are used as architectural facade elements may physically and mechanically deteriorate due to natural or man-made factors such as pollution, harmful industrial emissions, freeze-thaw, and heating-cooling. Various methods are used to predict or assess the effects of these factors on the stones. In this study, natural stones found in Bilecik region will be investigated for their durability by employing air permeability apparatus. First the air permeability indices of the stones were determined then this parameter was correlated to physico-mechanical properties of the natural stones using conventional statistical methods.

Keywords: Natural stone, durability, air permeability, marbles.

TEŞEKKÜR

Yazarlar; bu projenin uygulamaya geçirilmesinde desteklerini esirgemeyen, Umutlar Madencilik'ten Umut Karamanođlu'na, Bilecik Granitaş A.Ş'ne, Silkar A.Ş'ne, Bursa Doğal Taş İşletmeleri'nden Zeynep Eskili'ye teşekkür eder.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER	vi
ÇİZELGELER	vii
KISALTMALAR ve GÖSTERİMLER	viii
1. GİRİŞ	1
2. AMAÇ ve KAPSAM	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM	8
3.1. Doğal taş fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi	8
3.1.1. <i>Atmosfer Basıncında Su Emme</i>	9
3.1.2. <i>Görünür Yoğunluk ve Açık Gözeneklilik</i>	9
3.2. Doğal taş örneklerinin hava permeabilite değerlerinin belirlenmesi	9
3.2.1. <i>Deney düzeneginin hazırlanması</i>	10
3.2.2. <i>Test numuneleri</i>	13
3.2.3. <i>Örneklerin test edilmesi</i>	14
3.2.4. <i>Hesaplamalar</i>	16
4. ANALİZ VE BULGULAR	18
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	25
KAYNAKLAR	27

ŞEKİLLER

Şekil 1. Permeabilite test hücre düzeneği

Şekil 2. Conta imalatında kullanılan reçineler

Şekil 3. Sızdırmazlık conta modelleri

Şekil 4. Permeabilite test hücreleri

Şekil 5. Test numunelerinden örnekler

Şekil 6. Verilerin kaydedilmesi, yazılım ara yüzü.

Şekil 7 Ölçülen basınç düşüşlerine ait örnek eğriler.

Şekil 8. Basınç düşüşünün eğrisel takibi ve eğim eğrisi.

Şekil 9. Traverten örneğine ait basic düşüşü-zaman eğrisi.

Şekil 10. Ağırlıkça su emme ve API değerleri arasındaki ilişkiler.

Şekil 11. Görünür yoğunluk ve API değerleri arasındaki ilişkiler.

Şekil 12. Açık gözeneklilik ve API değerleri arasındaki ilişkiler.

ÇİZELGELER

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan doğal taşlara ait genel veriler.

Çizelge 2. Doğal taşlara ait hesaplanan hava geçirgenlik indeks değerleri.

KISALTMALAR ve GÖSTERİMLER

API: Hava geçirgenlik indeks değeri

MIP: Cıvalı porozimetre (mercury intrusion porosimetry)

P: Porozite

RH: Rölatif nemlilik

D : gözenek çapı

γ : Cıvanın yüzey gerilimi

θ : Cıva ile gözenek duvarı arasındaki kontak açısı

ρ_b : Numunenin görünür yoğunluğu

ρ_{rh} : Suyun yoğunluğu

m_d : Kuru numune kütlesi

m_s : Doygunlaştırılmış numune kütlesi

m_h : Su içerisine batırılmış numune kütlesi

ρ_o : Numunenin açık gözenekliliği

P_0 : t_0 anında başlangıç içsel basınç değeri

P_t : t_0 anından t anına kadar ölçülen basınç değerleri

k : test örneğinin permeabilite katsayısı

ω : oksijenin molekül kütlesi

V : Permeametre içinde basınç altındaki oksijenin hacmi

g : yerçekimi ivmesi

R : Gaz sabiti

d : Ortalama örnek kalınlığı

\emptyset : Sıcaklık

z : Regresyon analizinden belirlenen doğrunun eğimi

PI: Permeabilite indeksi

1. GİRİŞ

Doğal taş durabilitesi, geniş bir zaman diliminde doğal taşın dayanıklılık, ayrışma, direnç özelliklerini ve orijinal boyut ve görünüm özelliklerini koruma yeteneğinin bir ölçüsüdür (Bell, 1980, 1993). Durabilite aynı zamanda bir doğal taşın yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin göstergelerindedir (Sims, 1991). Doğal taş durabilitesinin değerlendirilmesi için birçok yaklaşım bulunmaktadır. Doğal taş durabilite değerlerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan testlerden biri de asit emdirme testidir (Leary, 1986). Bu testte doğal taş örneği, 10 gün boyunca yoğunluğu 1.145 mg/m^3 olan sülfürik asit içerisinde bekletilir. Testin amacı asit yağmurlarına karşı doğal taş durabilitesinin belirlenmesidir. Bu testte asitten etkilenmemiş taş örnekleri asite karşı dayanıklı kabul edilir ve bu taşların dış yapılarda kullanımının uygun olduğu kabul edilir. Aynı test 1.306 mg/m^3 sülfürik asit yoğunluğunda da tekrarlanır. Doğal taş örneği asite batırma testinden asite karşı dirençli çıkarsa kristalizasyon testine tabi tutulur. Kristalizasyon testi için magnezyum ya da sodyum sülfat kullanılır. Bu testte de taş örnekleri %15'lik çözelti içine batırılarak 15 döngü sonucunda ağırlık kaybı gözlemlenir.

Donma etkisiyle bozunma da, doğal taş durabilitesini etkileyen önemli faktörlerden birisidir (Ingham, 2005). Donmanın etkisiyle oluşan zarar, yağmur ya da kar toplanan yüzeylerde küçük parçalar kopması şeklinde meydana gelir. Çoğu magmatik kayacık, kumtaşları ve bazı kireçtaşları donmaya karşı mukavimdir. Dona karşı duyarlılık sözcüğü konusu olduğunda, porozite, gözenek boyutu ve su emme değerleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Su, buza dönüştüğünde hacmi artar ve gözeneklere basınç uygulamaya başlar. Bu dönüşüm birden fazla gözenekte gerçekleştiğinde etkisi artar. Buz oluştuğunda, sıcaklığın düşmesiyle iç basınç hızlıca artar, -22°C 'de buz yaklaşık 200 MPa basınç uygulayabilir (Winkler, 1973). Genellikle, iri taneli kayalar ince kristalli kayalara göre donmaya karşı daha mukavimdirler. Donma-çözünme durabilitesi için kritik gözenek açıklığı 0.005 mm 'dir. Bir başka deyişle, gözenek çapı büyük kayalar donma etkisine karşı daha az duyarlıdır. %5'in üzerinde su emen ince taneli kayalar donma etkisine karşı oldukça duyarlı olmalarına rağmen %1'den az su emen kayalar dona karşı oldukça dayanıklıdır (Anon, 1983).

Yapı malzemesi olarak kullanılan doğal taşlarda bozunmaya etki eden faktörlerden birisi de, özellikle donma etkisiyle bir araya geldiğinde olumsuz sonuçlar doğuran tuz kristalleşmesidir (Jefferson 1993). Poroz malzemelerde gözenek yapısına bağlı olan kristalizasyon basıncı, tuzun doygunluk derecesi ile kristal ve gözenek çeperi arasındaki enerji farkı, tuz kristalleşmesi, bozunma sürecinde doğal taşta etki eden en önemli faktörlerdendir. Büyük boşluklarda kristalizasyon basıncının düşük olduğu bilinir (Fitzner, 1988; Benavente ve diğerleri., 1999, Flatt 2002). Yüksek doygunluk derecesi yüksek kristalizasyon basıncına neden olur (Scherer, 1999, Flatt, 2002). Literatürde tuz etkisiyle doğal taş durabilitesinin belirlenebilmesi için birçok çalışma mevcuttur. Mevcut çalışmaların birbirinden farkı deneysel koşullardır. Örnek sayısı ve boyutu, tuz çözeltisinin özelliği, tuz konsantrasyonu, sıcaklık, rölatif nemlilik ve tekrar sayısı deneysel farklılıkların genel başlıkları olarak sıralanabilir (Sperling and Cooke, 1985; Richardson, 1991; Jefferson, 1993; Goudie, 1993, 1999; Goudie and Viles, 1995; Ordonez ve diğerleri., 1997; Benavente ve diğerleri., 2001). Doğal taşların bozunma prosesinin belirlenmesi için en yaygın kullanılan tuz kristalizasyon testi Benavente ve diğerleri tarafından önerilen kısmi daldırma testidir (Benavente ve diğerleri., 2001). Bu testte 2.5x2.5x4 cm boyutlarında 3 örnek kullanılır. Test için %14 ağırlık/hacim oranında Na₂SO₄ çözeltisi hazırlanır. Deney her biri 24 saat olmak üzere 15 döngüde tekrarlanır. Her bir döngü iki ayrı aşamaya ayrılır; bunlar kılcal doygunluk (40°C ve %80 RH) ve soğutma aşamasıdır (10°C ve %70 RH). Deney sonunda kütle kaybına bakılarak tuz kristalizasyon etkisi belirlenir. Genel olarak tuz kristalizasyon testleri; donma etkisi, ıslanma kuruma döngüleri gibi diğer bozunma mekanizmalarıyla birlikte doğal taş durabilitesinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılırlar. Bütün önemli parametreler kompleks bir şekilde etkileşirler ve yüksek oranda değişkendirler. Birbiri ile ilişkili bütün işlemler lineer olmadığından doğal taşın davranışının belirlenmesi gerçek bina yüzeylerinde oldukça zordur (Esbert ve diğerleri., 1991).

Doğal taş durabilitesinin tahmini için bir başka yaklaşım da durabilitenin hem taşın dayanım özellikleri ile hem de gözenek yapısıyla ilişkili olduğu yönündedir. Örneğin, yüksek basınç dayanımı ve Young Modülü değerine ya da yüksek sismik hız değerine sahip doğal taşların durabilitesi de yüksek olur (Zezza, 1990; Valdeon ve diğerleri., 1996; Goudie, 1999; Nicholson, 2001).

Doğal taş durabilitesinin belirlenmesi için genel olarak basit tahminleme araçları, dayanım özelliklerinden daha çok kullanılır. Fakat yaygın kullanılan durabilite tahminleme modelleri dayanım özelliklerinden çok boşluk yapısını kullanırlar. En basit tahminleme aracı da kayacın toplam boşluk hacminin, kayacın toplam hacmine oranı olarak tanımlanan porozite, P , değeridir (Gauri ve Bandyopadhyay, 1999). Fakat porozite (gözeneklilik) hesaplanırken kayaç yapısındaki gözeneklerin korelasyonu da göz önüne alınmalıdır. Yani bir kayacın porozitesi yüksek olup da su tutma özelliği düşük olabilir. Özellikle tanelerin birbiriyle bağlantısını gösteren porozite değeri bozunmayı sağlayan malzeme taşınması, tuz kristalizasyonu, donma aktivitesi gibi bozunma prosesine ve böylece de durabiliteyle direkt ilgilidir. Bağlantılı porozite değerinin hesaplanması için birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan doğal taş için en yaygın olarak kullanılan metot, cıvalı porozimetre (mercury intrusion porosimetry (MIP)) yöntemidir (Benavente ve diğerleri., 2004). Bu yöntemde kullanılan cıvalı porozimetreler ıslatımsız bir sıvının yeterli basınç uygulanmadıkça küçük gözeneklere giremeyeceği fiziksel prensibine göre çalışır. Uygulanan basınç ile gözenek çapı arasındaki ilişki, silindirik gözeneklere sahip bir malzeme için geçerli Washburn denklemi ile elde edilmektedir (Bağıntı 1).

$$D = (-4\gamma \cos\theta) / P \quad (1)$$

Burada P uygulanan basınç, D gözenek çapı, cıvanın yüzey gerilimi (480 dyne/cm) ve θ cıva ile gözenek duvarı arasındaki kontak açısıdır (genellikle 140°). Bu düzenek ile cıva intrüzyon verilerinden gözenek boyutu/hacim dağılımlarının oluşturulmasında yararlanılır. Bu testte boşluk oranını bulabilmek için $\text{Ø}25 \times 30$ mm ölçüsünde olmak üzere toplam 18 karot hazırlanır ve ASTM D 4404 standardında belirlenen esaslara uygun olarak cıvalı porozimetre cihazı ile boşluk miktarları belirlenerek boşluk oranları hesaplanır (ASTM D 4404).

Türkiye’de doğal taş numuneleri içerisindeki boşluk oranının belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan metot da görünür yoğunluk ve açık gözeneklilik testidir. Görünür yoğunluk ve açık gözeneklilik testleri için, TS EN 1936 standardına (Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 2000) uygun olarak, kenar uzunlukları 70 ± 5 mm olan altı adet küp

numune kullanılır. Numuneler, sabit kütleye (m_d) gelinceye kadar 70 ± 5 °C' da kurutulur. Kurutma işleminin ardından 0.01 gr hassasiyette tartımları alınan numuneler, atmosfer basıncında su kabı içine bırakılır. Numuneler 48 saat su içerisinde bekletildikten sonra 0.01 hassasiyetteki Archimed terazisi kullanılarak, sudaki kütle (m_h) tartımları kaydedilir. Bu işlemin ardından, numune hızlı bir şekilde kurutularak tekrar tartılır (m_s).

Görünür yoğunluk ve açık gözeneklilik, sırasıyla Bağıntı (2) ve Bağıntı (3) yardımıyla hesaplanır.

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad (2)$$

$$\rho_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (3)$$

ρ_b : Numunenin görünür yoğunluğu, g/mm³

ρ_{rh} : Suyun yoğunluğu, g/mm³

m_d : Kuru numune kütlesi, g

m_s : Doymunlaştırılmış numune kütlesi, g

m_h : Su içerisinde batırılmış numune kütlesi, g

ρ_o : Numunenin açık gözenekliliği, %

Deney koşullarından da görüldüğü gibi her bir işlem basamağı ve her bir tartım işleminde testi yanılısamaya götürecek birçok faktör bulunmaktadır. Numunenin kurutulup yeniden tartılması için geçen süre, kurutmanın şekli ve kurutma sırasında gözle görülemeyen partiküllerin tartıma etkisi, son derece küçük tartım değerleriyle çalışılan bu testin güvenilirliğine etki etmektedir.

Genel olarak yapı elemanları ve yapı malzemeleri, inşa edildiği günden itibaren yapının kendinden ve dışından gelen mekanik, fiziksel ve kimyasal etkenlerin etkisinde kalarak,

zaman içinde başlangıçtaki özelliklerini yitirir ve hasara uğrarlar. Bir yapı malzemesi olarak doğal taşlar da benzer davranış gösterirler. Bu yüzden doğal taşlar kullanım yerlerine göre farklı yapı ve özelliklerde seçilirler. Doğal taşların kullanım yerlerindeki performansını artırmak için tüm bu etkenlerin proje aşamasında dikkate alınması gerekir; ancak mevcut durabilite belirleme testleri ile doğal yapı taşlarının belirlenmiş durabilitesinin doğal taş servis ömrü için yeterli olmadığını, özellikle dış ortamın eskitici etkisine maruz kalan yapılarda beklenmedik hasarların oluşmasından açıkça görülmektedir.

Doğal taşların mineral bileşimleri, dokuları, sertlikleri, donma-çözünme etkisi altında basınç dayanımları ve aşınmaya karşı dayanım özellikleri, doğal taşın kullanım yerine uygunluğu açısından bilinmesi gereken niteliklerdir. Doğal taşların dayanıklılığı geçmiş yıllarda sadece mukavemet değeri ile ölçülürdü. Oysa günümüzde dayanıklılığın sadece dayanımın yüksek olması ile ilişkili olmadığı bilinmektedir. Doğal taşlar kimyasal, fiziksel ve çevresel etkilerden dolayı aşınma kırılma gibi yıpratıcı etkilere maruz kalırlar. Bundan dolayı doğal taşların sadece dayanıklı olması değil, aşınma kırılma, bozulma ve don etkilerine karşı da dayanıklı olması istenir. Doğal taşların kırılma, aşınma ve parçalanma etkilerine karşı gösterdiği direnç genel anlamda durabilite (dayanıklılık) ile ifade edilir. Dayanıklılık öncelikle kullanım yerinin iklimsel koşullarına, kullanım şartlarına, petrografik özelliklerine, taneler içindeki süreksizliklere, tanelerin boşluk oranına ve bu boşlukların suya doygunluk derecesine bağlıdır. Dayanıklılık özellikleri genel olarak yapı ve kaplama elemanı olarak doğal taşların kalitesi hakkında önemli bir göstergedir (Doehne, 2010).

Hızla gelişmekte olan doğal taş sektörü, son yıllarda Türkiye madencilik sektörünün en önemli alt sektörlerinden biri olarak ortaya çıkmış ve aynı zamanda gelişimini artırarak Türkiye ekonomisinin de en önemli yapı taşlarından biri olmaya aday duruma gelmiştir. Son yıllarda Türkiye doğal taş ihracatının, bor mineralleri ihracatını geçmiş olması da dikkat çekicidir. 2010 yılı itibariyle 1.225.000.000 doların üzerinde ihracat geliri elde eden söz konusu sektör, toplam maden ihracatımızın % 50'den fazlasını tek başına sağlamakta olup, sektörün yakın gelecekteki hedefi bu rakamın çok üstündedir. Türkiye'nin doğal taş üretimi ve ihracatı, yılda yaklaşık %8 civarında bir büyüme

gösteren dünya doğal taş ticaretine paralel olarak, sürekli bir artış göstermektedir. Türkiye'nin dünya doğal taş rezervlerinin yaklaşık % 40'ına sahip olduğu belirtilmektedir. Dünya rezervlerinin önemli bir bölümüne sahip olmasına rağmen, Türkiye'nin dünya doğal taş pazarındaki payı %8 civarındadır. İhracat gelirlerindeki artışlar, uluslararası standartlara uygun kalitede işleme tekniklerinin de geliştirilmesi zorunluluğunu beraberinde getirmiştir. Doğal taşların daha kaliteli ve rekabet edebilir fiyatlarla işlenip dış pazarlara sunulabilmesi ülkemiz ekonomisi için büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle doğal taş sektöründe kalite ve verimliliği arttırmak amacıyla yapılacak araştırma ve geliştirme çalışmalarına gereksinim duyulmaktadır (Yurdakul, 2010).

Bu kapsamda son yıllarda dünyada ve Türkiye'de, özellikle dış ortam etkilerine maruz kalacak malzemelerin durabilitesi ile ilgili kapsamlı çalışmalar yapılmakta, durabilitenin tasarımda dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır.

Türkiye'de doğal taş üretiminin %11.14'ünü tek başına Bilecik ili gerçekleştirmektedir (Uyanık, 2008)

Üretim yüzdesinin bu kadar yüksek olduğu Bilecik bölgesinde, Bilecik'ten çıkarılan ve Bilecik'te işlenen doğal taşlarının kullanıldığı yapıların sağlıklı ömrünün uzatılması için gerçeğe uygun değerlendirmelerin yapılması ve doğal taş servis ömrünün önceden tahmin edilmesi tasarımcılar, uygulayıcılar ve kullanıcılar için önemli bir kazanımdır.

Bu çalışmada Bilecik bölgesinde çıkarılan ve üretimi yapılan doğal taşların durabilite özelliklerinin belirlenmesine yönelik bir yaklaşım getirilmesi amaçlanmıştır.

Dışsal etkilerle taşın içerisine nüfuz eden bileşenlerin, taşın görünüm, dayanım, direnç gibi özellikleri değiştirme etkisi olarak tanımlanan doğal taş durabilitesinin belirlenmesinde literatürden de anlaşıldığı gibi hangi deney metodu kullanılırsa kullanılsın, genel amacın taşın bünyesindeki boşlukların dağılımı ve bu boşluklara dolan maddelerin etkisinin belirlenmesi olduğu bilinmektedir. Bu anlamda taşın içerisindeki

gözenek durumunun belirlenmesi, dolayısıyla taşın geçirgenlik özelliği önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, durabilitenin ve doğal taş bozulmasının belirlenmesinde kullanılan mevcut deney yöntemlerinin zaman alıcı olması, deney düzeneklerinin pahalı yatırımlar ve karışık deney cihazları gerektirmesi gibi nedenlerle, özellikle beton durabilitesinin belirlenmesinde kullanılan oksijen permeabilite yönteminin, doğal taş permeabilite özelliklerinin belirlenmesinde uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bilecik yöresi doğal taş örneklerinin hava permeabilite değerleri belirlenerek, permeabilite değerlerinin, doğal taş gözenekliliği ile ilgili belli başlı doğal taş fiziko-mekanik özellikleri ile ilişkileri de araştırılmıştır.

2. AMAÇ ve KAPSAM

Geçmişten günümüze mimari yapılarda mimari bir öge olarak kullanılan doğal taşlar; hava kirliliği, çeşitli sanayi gazları, donma-çözülme, ısınma-soğuma gibi doğal ve doğal olmayan etkiler altında kalarak görünüm, fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişime ve dolayısıyla bütünlük kaybına uğrayabilmektedir. Bu değişimlerin etkilerini önceden tahmin etmek ya da mevcut durumlarında inceleyebilmek oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Bilecik ili doğal taş işleme tesislerinden seçilmiş numunelerin hava permeabilite değerlerinin belirlenmesi ve bu değerlerin kayaç fiziko-mekanik özellikleri ile ilişkilerinin modellenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla, ilk aşamada permeabilite değerlerinin belirleneceği deney düzeneği oluşturulmuştur.

Çalışmanın ikinci aşamasında, Bilecik ili doğal taş işleme tesislerinden ölçüm yapılacak doğal taşlara ait örnekler toplanmıştır.

Üçüncü aşamada örneği alınmış doğal taşların çeşitli fiziko-mekanik özellikleri laboratuvar çalışmaları ile belirlenmiştir.

Son aşamada ise durabilite özelliğini etkileyen permeabilite değerleri ile doğal taş fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler incelenerek, permeabilite değerlerinden doğal taş fiziko-mekanik özelliklerinin önceden belirlenmesine yönelik tahmin modelleri geliştirilmiştir.

Doğal taş tüketiminin yaygınlaşması ve aynı zamanda bu alanda faaliyet gösteren üretici firmalar arasındaki rekabetin artması, çeşitli durabilite özelliklerinin ortaya konularak doğru yapıya doğru taş kavramını ön plana çıkarmıştır. Uygulamada, kullanılacak doğal taşın fiziko-mekanik özelliklerine uygun kullanım yerinin belirlenmesi, özellikle anıtsal yapı olarak tasarlanmış projelerde hayati öneme sahiptir.

Bu amaçlar doğrultusunda doğal taş permeabilite değerinin belirlenmesi için “*South African Air Permeability Index (Güney Afrika Hava Geçirgenlik İndeksi)*” değeri kullanılmıştır. Beton yüzeylerinde uygulama alanı bulan hava permeabilite testi, genel olarak beton yüzeyi ve yüzeyle temas halindeki tüm prosesin, gaz ve iyonik difüzyon ile su emme gibi taşınma mekanizmalarından etkilendiği fikrinden yola çıkarak geliştirilmiştir (Alexander ve diğerleri, 2001, Mackechnie & Alexander 2002, Beushausen ve diğerleri, 2003, Streicher & Alexander 1995, Mackechnie 2002).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmalar sırasında yapılan araştırmalar ve kullanılan yöntemler aşağıda sıralanmıştır;

- Doğal taşların fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi için söz konusu işletmelerde uygun boyutlarda doğal taş bloklarının temini.
- Bozüyük meslek yüksekokulu laboratuvarlarında, kayaç örneklerinin, atmosfer basıncında su emme, görünür yoğunluk ve açık gözeneklilik değerlerinin belirlenmesi.
- Verilerin analizi.

3.1. Doğal taş fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Çalışmada, literatürde doğal taş tanımlamalarında kullanılan, gözeneklilik ile ilgili belli başlı fiziko-mekanik özellikler belirlenmiştir.

3.1.1. Atmosfer Basıncında Su Emme

Su emme deneyi için, TS EN 13755 standardına (Türk Standartları Enstitüsü, Ocak 2003) uygun olarak, kenar uzunlukları 70 ± 5 mm olan altı adet küp numune kullanılmıştır.

3.1.2. Görünür Yoğunluk ve Açık Gözeneklilik

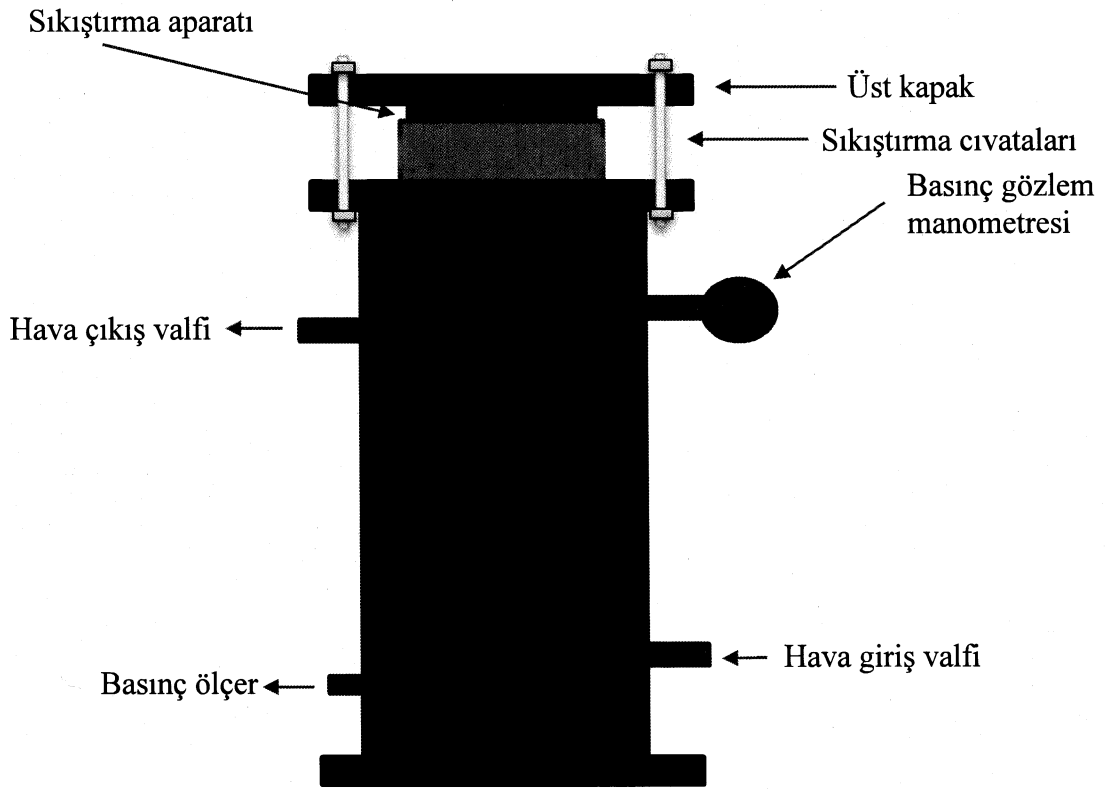
Doğal taş örneklerinin görünür yoğunluk (ρ_b) ve açık gözeneklilik (ρ_o) değerleri TS EN 1926 (Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 1926 Doğal Taşlar-Deney Metotları-Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini, s.5) standardına göre bulunmuştur.

3.2. Doğal taş örneklerinin hava permeabilite değerlerinin belirlenmesi

Hava permeabilite testi ilk defa Alexander, Ballim ve Mackechnie (1999) tarafından tanımlanmıştır. Beton permeabilite değerinin ve dolayısıyla beton kalitesine bir yaklaşım getirmek için tasarlanmıştır. Özellikle betonarmede koruyucu yüzey tabakasının kalitesinin belirlenmesinde kullanılır. Bu projede Bilecik yöresi seçilmiş doğal taşlarının hava permeabilite değerlerinin (API) belirlenmesi amacıyla bir deney düzeneği oluşturulmuştur.

3.2.1. Deney düzeneğinin hazırlanması

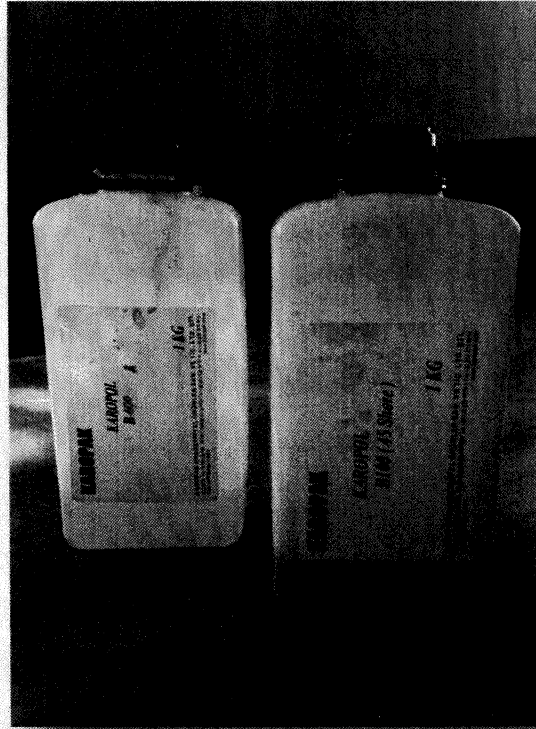
Proje kapsamında oluşturulan deney düzeneği Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Permeabilite test hücre düzeneği

Düzenek; basitçe, sızdırmazlığı sağlanmış metal bir test hücresi içerisine test numunesinin yerleştirilmesi ve sistemden eksilen basınç miktarının belirlenmesi esasına göre çalışır.

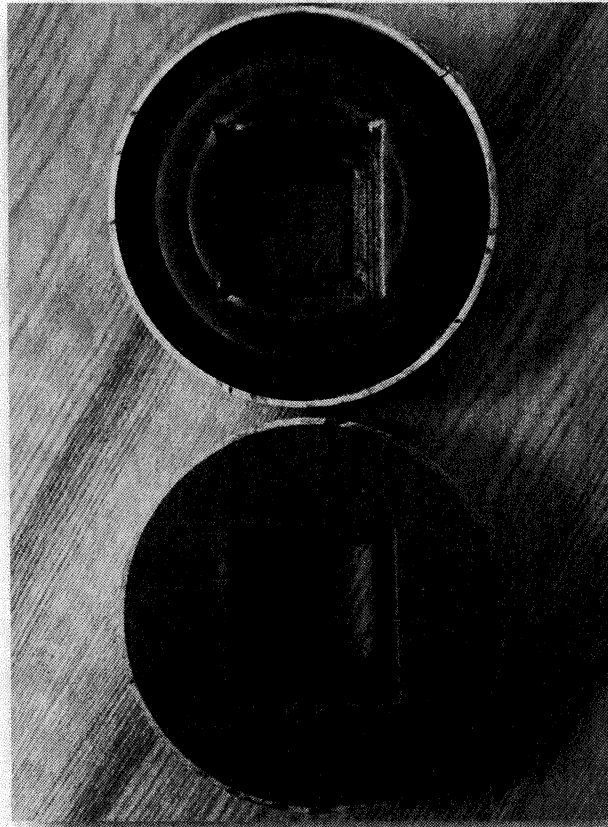
Sistemde sızdırmazlığın sağlanması için numune boyutlarına uygun kauçuk conta imal edilmiştir. Kauçuk conta numune boyutlarına uygun olarak 70 ± 1 mm boyutlarında ve 2cm kalınlığındaki numuneyi içine alacak şekilde, iki farklı reçinenin karıştırılması ile imal edilmiştir. Kullanılan reçineler uygun sertlikte (Shore 45) contayı oluşturacak şekilde karıştırılarak uygulanır (Şekil 2).



Şekil 2. Conta imalatında kullanılan reçineler

Numunenin hücre içinde sıkışmasını sağlamak ve çeperleri boyunca sızdırmazlığı sağlamak amacıyla Shore sertlik değeri 45 olan, sıkıştırılabilir kauçuk conta kullanılır. Contalarda çatlak ve yarık meydana geldiğinde değiştirilmelidir.

Permeabilite düzeneğinin oluşturulmasında sızdırmazlığı sağlamak amacıyla numunenin yerleştirileceği conta iki farklı modelde üretilmiş ve her ikisinde de başarı sağlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Sızdırmazlık conta modelleri

Permeabilite test düzeneğinin oluşturulması aşamasında ilk olarak bir model hazırlanmış o modelden elde edilen tecrübelerle 2. ve 3. test hücresi oluşturulmuştur. Oluşturulan test hücreleri paslanmaz çelikten imal edilmiştir (Şekil 4).

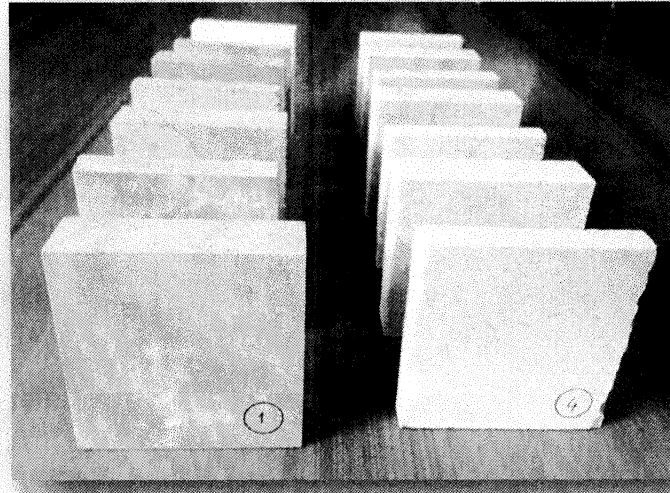


Şekil 4. Permeabilite test hücreleri

Deneyle kontrol edilebilir oda sıcaklığında ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$) gerçekleştirilmiştir. Deneyle başlamadan önce permeabilite hücresinin sızdırmazlığı, geçirimsiz test örneği (metal plaka) ile test edilmiştir. Düzenek 100 kPa basınçta 24 saat bekletilerek sızdırmazlığı kontrol edilmiştir. 24 saat süre sonunda değişim 0 kPa olarak gözlenmiştir.

3.2.2. Test numuneleri

Hava permeabilite testi orjinalinde her bir test için 4 test örneği kullanılır. Ancak doğal taşlarda numunelerin birbirinden farklılık gösterebileceği göz önünde bulundurularak her bir test için 6 test örneği kullanılmıştır. Test örnekleri 70 ± 2 mm ölçülerinde kübik formda ve 20 ± 2 mm kalınlığında ve düzgün yüzeyler oluşturacak şekilde kesilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Test numunelerinden örnekler

Her bir numune, kesimi yapıldıktan sonra fırında $50 \pm 2^\circ\text{C}$ de 7 gün \pm 4 saat bekletilmiştir.

3.2.3. Örneklerin test edilmesi

- Test örnekleri desikatörde $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'ye kadar soğutulur. Soğutma periyodu 2 saatten daha az, 4 saatten daha fazla olmamalıdır. Ya da örnekler rölatif nemliliği %60'dan az olan $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ortamda çelik bir tepsi üzerinde 2 saatten az 4 saatten fazla olmamak koşulu ile bekletilirler.
- Numune kalınlığı birbirine eşit uzaklıkta 4 noktadan 0.02 mm hassasiyette kumpas ile ölçülüp 4 ölçümün ortalaması kaydedilir.
- Numune kauçuk conta içine kenarlar arasında boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilir.
- Numune kauçuk conta ile birlikte deney hücresi üst kısmına yerleştirilir ve üst kapakla birlikte deney hücresine sıkıştırılır.
- Numune, deney hücre merkezine ortalananak şekilde üst kapak vidaları yavaş yavaş sıkıştırılır.
- Deneyler, numuneler desikatörden çıktıktan minimum 30 dakika sonra başlatılır.

- Hava giriş ve çıkış valfleri açılarak 5 saniye süreyle permeametreye (test hücresi) hava dolması ve hücre içindeki diğer gazların hücreyi terk etmesi sağlanır.
- Hava çıkış valfi kapatılır.
- Hücreye 100 kPa hava dolduğunda hava giriş valfi kapatılır.
- Hücre içindeki basınç 100 ± 5 kPa olacak şekilde ayarlama yapılır. Başlangıç zamanı t_0 ve başlangıç basıncı P_0 olarak kaydedilir. İlk basınç 5 kPa ile 100 kPa arasında olacak ve hesaplamalarda t_0 ve P_0 değerleri kullanılacaktır.
- 5 dakika sonra hücre kontrol edilerek zaman ve basınç okuması yapılır. Eğer basınç hızlıca düşmüşse (> 5 kPa/dakika), sistemde bir kaçak olabilir. Bu durumda valfler ve kapak gevşetilerek test tekrarlanır.
- Okumalar 5 ± 1 kPa değişim frekansı ile tekrar edilmelidir. Her bir okumada süre ve 0.5 kPa hassasiyetle basınç değerleri kaydedilmelidir.
- Test basıncı 50 ± 2.5 kPa düştüğünde ya da 6 saat ± 15 dakika sonra, hangisi önce gerçekleşirse test sonlandırılır. Test süresince minimum 8 okuma gereklidir.

Sistemde, basınç değerlerinin anlık ölçülmesiyle eş zamanlı olarak zaman parametresi de kaydedilmiştir. Bunun için proje kapsamında satın alınan program kullanılmıştır. Programda ölçüm aralıkları 2 saniyeden 1 saate kadar değişir. Proje kapsamında geçirim değerleri yüksek numuneler için ölçüm aralığı 2 saniye, geçirim değerleri düşük numuneler için ölçüm aralığı 15 dakika olarak seçilmiştir.

Test süresince ölçülen basınç değerleri ve zaman değerleri bir yazılım aracılığıyla, kaydedilmek üzere bilgisayar ortamına aktarılır. Kullanılan yazılımın ara yüzüne ait örnek pencere Şekil 6'da gösterilmektedir.

Tarih	Saat	TANK2	TANK1	TANK3	C001/4	C001/5
19.07.2013	17:33:28	1,165	1,157	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:29	1,164	1,157	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:30	1,164	1,157	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:31	1,164	1,156	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:32	1,164	1,157	1,183	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:33	1,164	1,156	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:34	1,165	1,157	1,185	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:35	1,165	1,158	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:36	1,165	1,157	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:37	1,164	1,158	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:38	1,164	1,157	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:39	1,164	1,157	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:40	1,164	1,156	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:41	1,165	1,157	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:42	1,164	1,156	1,184	0,0	0,0
19.07.2013	17:33:43	1,164	1,158	1,183	0,0	0,0

Şekil 6. Verilerin kaydedilmesi, yazılım ara yüzü.

3.2.4. Hesaplamalar

Standart bir test numunesi ile yapılan test sonucunda, 6 saat boyunca, numune türüne göre seçilen kayıt aralığında basınç değerleri kaydedilir. Elde edilen kayıtlardan zamana bağlı olarak basınç değişimi arasındaki ilişki gözlemlenir. " P_0 " testin başladığı andaki sistemdeki basınç değeri, " P_t " de kayıt esnasındaki zaman, t değeri de kaydedilen süre olmak üzere; lineer regresyon yöntemi kullanılarak " $\ln (P_0/P_t)$ " ile " t " arasındaki en iyi eğri belirlenir.

Regresyon eğrisinin (0,0) noktasından geçen doğrusunda:

P_0 : t_0 anında başlangıç içsel basınç değeri, 0.5 kPa hassasiyetle ölçülür.

P_t : t_0 anından t anına kadar ölçülen basınç değerleri, 0.5 kPa hassasiyetle kaydedilir.

Oluşturulan egride zaman ile " $\ln (P_0/P_t)$ " arasındaki korelasyon katsayısı değeri 0.99'dan büyük olmalıdır. Korelasyon katsayısı 0.99'dan küçükse, test tekrarlanmalıdır.

Testin tekrarı sırasında aynı örnek kullanılabilir. Eğer takip eden testte de aynı sonuç çıkarsa kullanılan örnek ıskartaya çıkartılmalı ve yeni bir örnek hazırlanmalıdır.

Eğri oluşturulduktan sonra D'arcy permeabilite katsayısı Eşitlik 4 yardımı ile hesaplanır.

D'arcy permeabilite katsayısı:

$$k = \frac{\omega V g dz}{RA\emptyset} \quad (4)$$

k : test örneğinin permeabilite katsayısı (m/s)

ω : oksijenin molekül kütlesi: 32 g/mol

V : Permeametre içinde basınç altındaki oksijenin hacmi (m^3) 0.01 litre ya da 0.00001 m^3 hassasiyetle kaydedilir.

Basınç hücresinin hacmi numunenin altında kalan hacimdir. Hücrenin mm hassasiyetindeki boyut ölçümleriyle ya da hücreye su doldurularak da bulunabilir.

g : yerçekimi ivmesi (9.81 m/s^2)

R : Gaz sabiti (:8.313 Nm/K mol)

d : Ortalama örnek kalınlığı (m)

\emptyset : Sıcaklık (K)

z : Regresyon analizinden belirlenen doğrunun eğimidir.

z değeri Eşitlik 5 yardımı ile hesaplanır:

$$z = \frac{\sum \left[\ln \left(\frac{p_0}{p_t} \right) \right]^2}{\left[\ln \left(\frac{p_0}{p_t} \right) t \right]} \quad (5)$$

Permeabilite katsayısı, her bir test örneği için hesaplanır. Permeabilite indeksi (API) örneklerin ortalama permeabilite katsayısının negatif logaritması ile bulunur. 4 örnek için API değeri Eşitlik 6 yardımı ile hesaplanır;

$$API = -\log_{10}[1/4(k_1+k_2+k_3+k_4)] \quad (6)$$

Permeabilite indeks test metodu permeabilite kafesinde, düzeneğin çıkış kafasına yerleştirilmiş numune içinden geçen havayla, sistemde oluşan basınç düşüşünün belirlenmesi şeklinde açıklanabilir.

Hava permeabilite indeksi, negatif logaritmik permeabilite indeksi olarak tanımlanır. Genel olarak PI, yaygın olarak kullanılan Güney Afrika Agregaları için 8.5-10.5 arasında değerler alır.

Permeabilite indeksinin logaritmik ölçekde değerlendirildiği ve dolayısıyla 8.5 ile 10.5 arasındaki farkın ölçümsel hassasiyeti göz önünde bulundurulmalıdır.

Beton için değerlendirildiğinde, çimento hamuru ile reaksiyona girmemesi ve dolayısıyla gözenek sistemi ile etkileşmemesi nedeniyle penetrasyon gazı olarak oksijen ya da hava kullanılır. Aynı etki kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) kökenli doğal taşlar için de söz konusudur.

4. ANALİZ VE BULGULAR

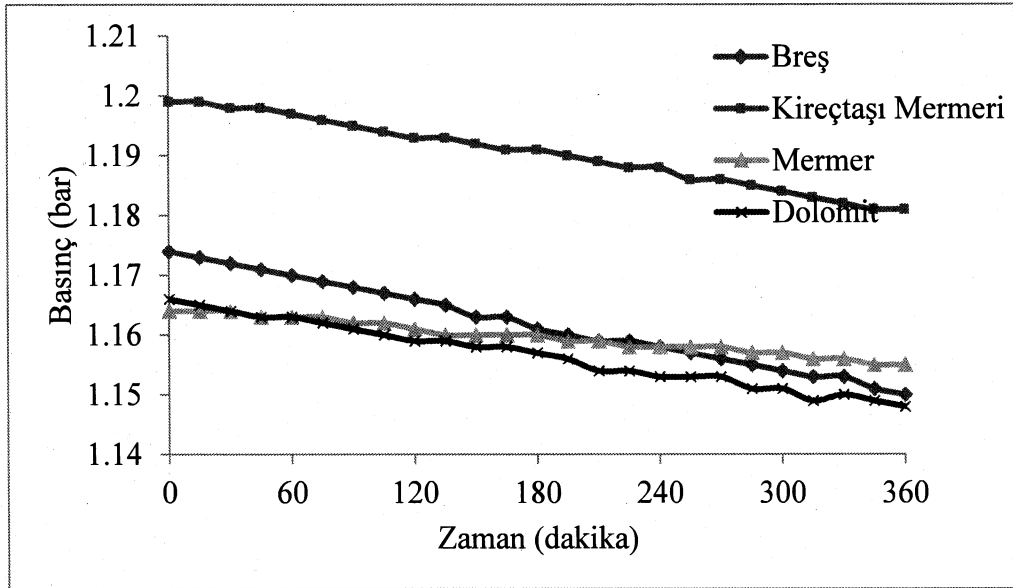
Yapı taşı olarak kullanılacak doğal taşlar için, kullanım yerinin doğru belirlenmesi, dayanım sürelerinin doğru tespit edilmesi gibi nedenlerle gözeneklilik değerlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada doğal taş gözenekliliği ile yakından ilişkili fiziksel ve mekanik özellikler ile doğal taşların hava geçirgenlik indeks değerleri belirlenmiştir. Bu amaçla her bir doğal taş örneğinin, atmosfer basıncında su emme, görünür yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri belirlenmiştir.

Çizelge 1'de çalışmada kullanılan doğal taşlara ait özelliklerin yer aldığı bulgular gösterilmektedir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan doğal taşlara ait genel veriler.

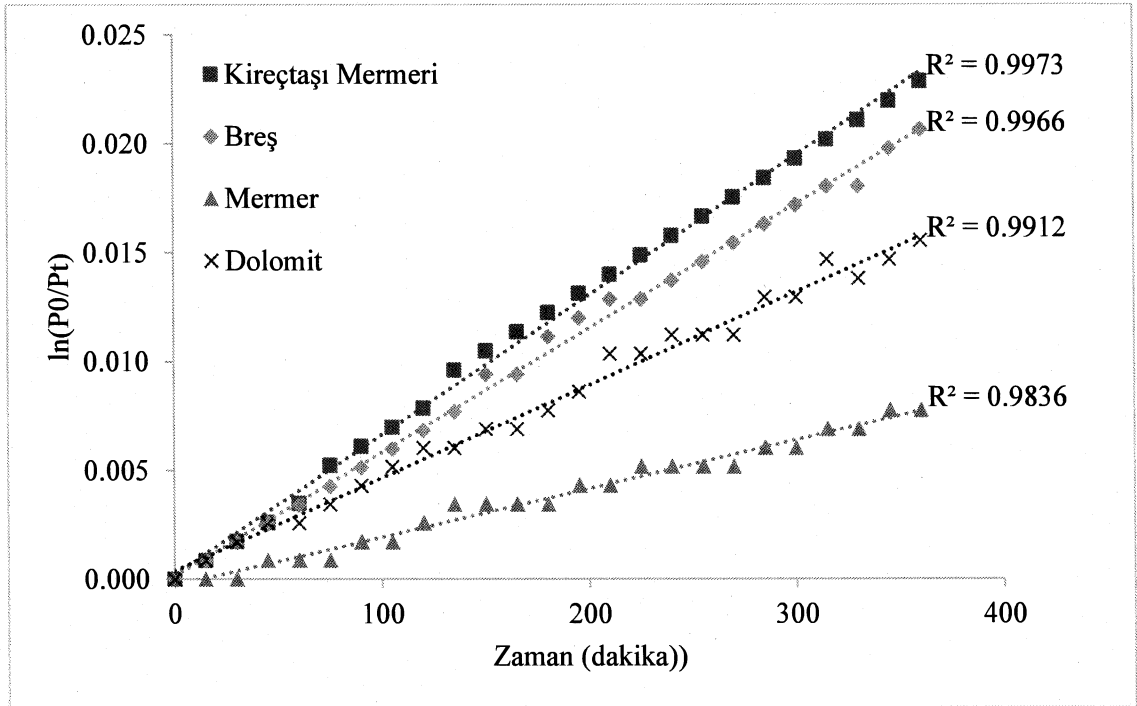
Ticari İsim	Bilimsel Sınıflama	A_b (%)	ρ_b (g/mm³)	ρ_o (%)
Rosso Galiano	Fosilli kireçtaşı	0.03	2.71	0.10
Royal bej	Fosilli kireçtaşı	0.04	2.62	0.13
Sogut Cappucino	Dolomitik intraklastlı kireçtaşı	0.18	2.71	0.41
Goksu Bej	Lakustrin mikritik kireçtaşı	0.06	2.69	0.21
Denizli Traverten	Kireçtaşı	1.99	2.39	4.75
Golden Traverten	Dolomitik kireçtaşı	0.99	2.64	2.71
Aksehir Siyahı	Rekristalize kireçtaşı	0.06	2.72	0.14
Burdur Bej	Mikritik kireçtaşı	0.34	2.69	1.04
Afyon Şeker	Mermer	0.08	2.74	0.18
Reis Beyazı	Mermer	0.02	2.73	0.03
Mugla Beyazı	Mermer	0.05	2.70	0.13
Kaplan Postu	Mermer	0.03	2.71	0.10
Usak Beyazı	Mermer	0.02	2.7	0.04
Afyon Sarı Trv.	Traverten	1.82	2.47	4.49
Karakaya Bej	Breş	0.23	2.58	0.61
Golden Tobacco	Dolomit	0.66	2.45	1.80

Deney için düzenek imalatı gerçekleştirilip sistem çalışır hale getirildikten sonra sızdırmazlık testleri yapılmıştır. Deney düzeneğinin doğru çalıştığına bir göstergesi olarak düzenek hem su içerisinde test edilmiş, hem de numune yuvasına geçirgenliği sıfır olan metal plaka konularak test edilmiştir. Bu aşamadan sonra hava geçirgenlik indeksi değerleri (API) belirlenmiştir. API değerleri ölçülürken, üzerinde gözle görülür çatlak-kırık sistemleri tespit edilmiş örnekler kullanılmamıştır. Deney başladığı andan itibaren sistemdeki basınç düşüşü, ilk 5 dakika içerisinde 0.5 bar'dan fazla ise o numune çatlak kabul edilmiş ve değerlendirmeye alınmamıştır. Numune test düzeneğine takıldıktan sonra yaklaşık 10 dakikalık basınç değerleri bir yazılım yardımıyla bilgisayar üzerinden kontrol edilir. Bir doğal taş örneğinin API değeri belirlenirken zamana bağlı basınç düşüşünün gözlemlenmesi ilk aşamadır. Zamana bağlı basınç değişimi eğrisinin gözlemlenerek, permeabilite hücresinde beklenmedik bir basınç değişimi olup olmadığı gözlemlenir. Sistemdeki olası bir kaçak durumunda ya da numunede önceden var olan ya da oluşabilecek çatlak ya da kırık durumunda numune değiştirilir ve test tekrar edilir. Çalışmada kullanılan doğal taş gruplarından her bir gruba ait zamana bağlı basınç düşüşü eğrilerine ait birer örnek Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Ölçülen basınç düşüşlerine ait örnek eğriler.

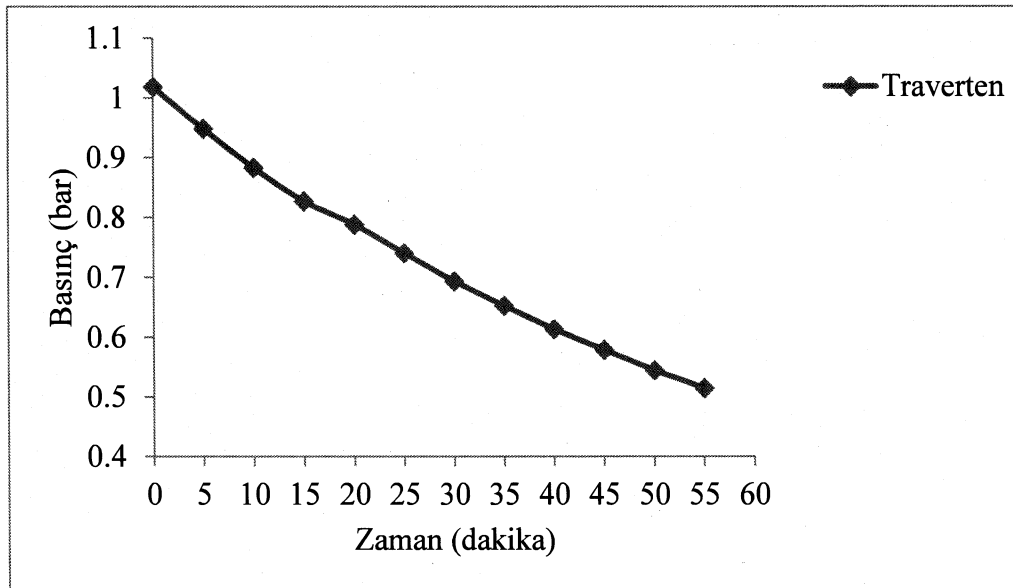
API değeri belirlenirken, orijinal test prosedürüne göre basınç değişimi ile zaman arasındaki değişimin, taşın içindeki boşluklardan başka herhangi bir nedenden kaynaklanmadığından emin olmak için, zaman ile " $\ln(P_0/P_t)$ " arasındaki eğrinin determinasyon katsayısından yararlanılır. Zaman ile " $\ln(P_0/P_t)$ " arasında belirlenen eğrinin determinasyon katsayısı 0.99 ve 0.99'dan büyük olmalıdır. Bu çalışmada kullanılan her bir doğal taş örneğine ait " $\ln(P_0/P_t)$ "-zaman eğrisine ait birer örnek Şekil 8'de sunulmaktadır. 96 farklı ölçüm yapıldığı için, üst üste çakışan şekillerin karmaşa yaratması nedeniyle, her bir grup taştan yalnız bir eğri Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Basınç düşüşünün eğrisel takibi ve eğim eğrisi.

Yapı taşı olarak kullanılacak travertenlerde durum kireçtaşı mermerleri ve gerçek mermerlerden biraz farklıdır. Bunun nedeni genel olarak travertenlerde gözenekler ve çatlakların gözle görülebilir büyüklükte olmasıdır. Travertenlerdeki gözeneklilik çıplak gözle görülemediği durumlarda porozite değerlerinin belirlenmesi deneysel bulgulara dayandırılarak gerçekleştirilir (Hall & Hoff, 2002). İster çıplak gözle görülsün ister deneysel metotlarla gözeneklilik belirlensin, özellikle travertenlerde gözeneklerin birbirlerine bağlı olup olmadığı yani doğal taşın uygulama yerindeki kalınlığı boyunca gözeneklerin birbirine bağlı olup olmadığı hem durabilite hem de kullanım ömrü anlamında oldukça önemlidir (Molina ve diğerleri., 2011; Siegesmund & Dürrast, 2011; Vázquez ve diğerleri., 2013). Bu çalışmada kullanılan traverten örneğine ait basınç değişimi-zaman eğrisi Şekil 9'da gösterilmektedir. Hava geçirgenlik indeks değeri yüksek numunelerde basınç değeri yaklaşık 0.5 bar'a indiğinde deney sonlandırılır. Traverten örneğinde gözle görülür boşluklar çok fazla olduğundan ve boşluklar da birbiri ile bağlı olduğundan basınç düşüşü 6 numunenin hepsinde, yaklaşık 55 dakikada 0.5 bar seviyelerine inmiştir. Testler sırasında traverten örneklerinin gözeneklerinden hava çıkışı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak gözle görülebilir gözenekliliğe sahip her örnekte aynı durum gözlenmez. Bazı doğal taşlarda gözeneklilik gözle görülebilir olmasına rağmen hava geçirgenliği oldukça azdır. Bu durum; gözeneklerin birbiri ile

bağlı olmamasıyla açıklanabilir. API testi sayesinde gözeneklerin birbiri ile bağlı (bağlantılı) olup olmadığı da anlaşılabilir.



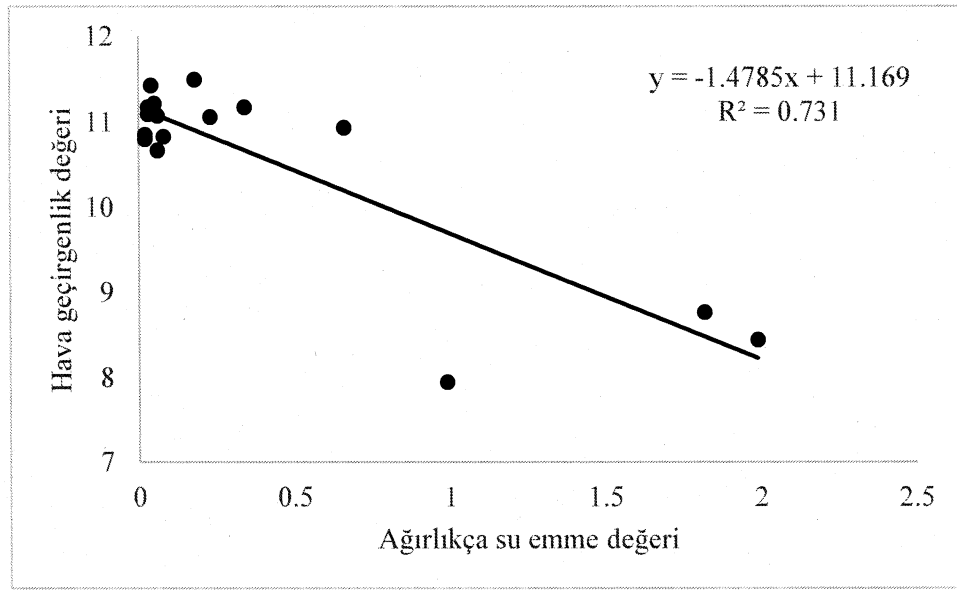
Şekil 9. Traverten örneğine ait basınç düşüşü-zaman eğrisi.

Çalışmada kullanılan test örneklerine ait hava geçirgenlik indeksi değerleri Çizelge 2’de sunulmaktadır.

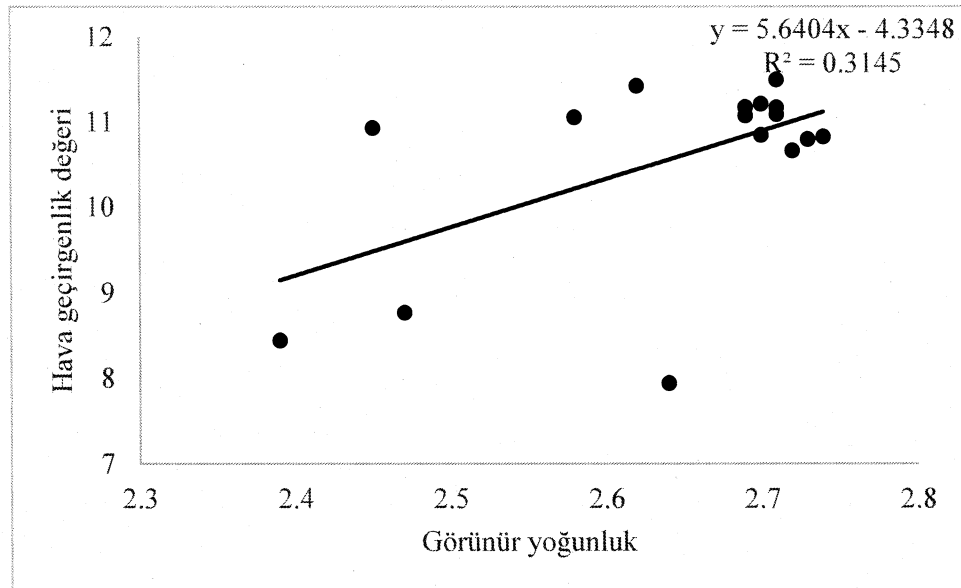
Çizelge 2. Doğal taşlara ait hesaplanan hava geçirgenlik indeksi değerleri.

Örnek	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	API
Rosso Galiano	11.674	10.461	11.114	11.048	12.128	10.604	11.172
Royal bej	11.322	11.630	11.503	10.647	11.525	11.934	11.427
Cappucino	11.502	11.384	11.401	12.026	11.229	11.448	11.498
Goksu Bej	11.474	11.182	11.085	10.778	11.228	10.709	11.076
Denizli Traverten	8.382	8.465	7.834	9.073	8.550	8.355	8.443
Golden Traverten	8.090	8.010	8.051	7.862	7.845	7.815	7.946
Aksehir Siyahı	10.974	10.453	10.080	10.649	11.102	10.740	10.666
Burdur Bej	11.057	11.065	11.161	11.632	11.583	10.548	11.174
Afyon Şeker	11.010	10.571	10.661	10.725	11.326	10.684	10.830
Reis Beyaz	10.642	10.518	11.055	10.140	10.808	11.624	10.798
Mugla Beyazı	11.827	10.777	10.790	11.561	11.352	10.983	11.215
Kaplan Postu	10.467	12.143	10.444	11.729	10.679	11.098	11.093
Usak Beyazı	11.150	11.520	10.387	11.465	10.354	10.229	10.851
Afyon Sarı Trv.	8.989	8.417	9.395	9.215	8.453	8.137	8.768
Karakaya Bej	11.251	11.113	11.136	10.497	11.234	11.115	11.058
Golden Tobacco	10.656	11.647	11.778	11.015	9.591	10.918	10.934

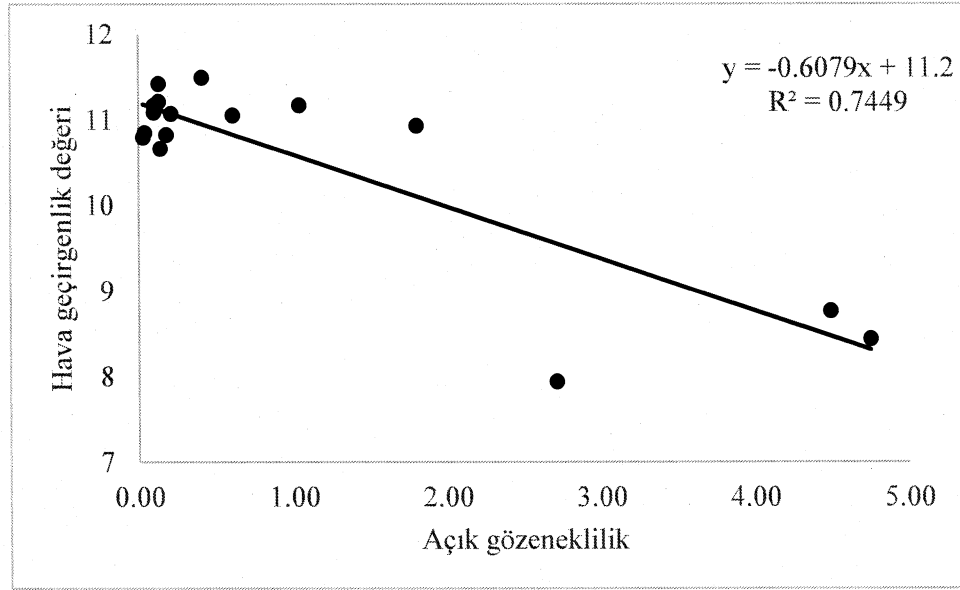
Doğal taşın fiziksel karakteristik özellikleri ile ölçülen API değerleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için basit regresyon analizi kullanılmıştır. API değerleri ile atmosfer basıncında su emme, görünür yoğunluk ve porozite değerleri arasındaki ilişki doğrusal fonksiyon kullanılarak incelenmiştir (Şekil 10-12). Bu özelliklerin seçilmesinin nedeni doğal taş gözenekliliği hakkında fikir veren en basit deneyler olmasından dolayıdır. Doğal taş kullanım yerinin seçilmesinde ve doğal taş genel özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılırlar.



Şekil 10. Ağırlıkça su emme ve API değerleri arasındaki ilişkiler.



Şekil 11. Görünür yoğunluk ve API değerleri arasındaki ilişkiler.



Şekil 12. Açık gözeneklilik ve API değerleri arasındaki ilişkiler.

Bir doğal taş içerisine nüfuz eden su miktarı ya da o taşın su emme değeri o taşın durabilitesinin belirlenebilmesi için oldukça önemli bir mühendislik parametresidir (Aboushook, Wakizaka, & Shinagawa, 1999; Benavente, García del Cura, Fort, & Ordóñez, 2004; Camuffo, 2000; Xeidakis & Samaras, 1980). Bir doğal su emme değeri bulunurken hangi standart kullanılırsa kullanılsın, o taşa doymun hale gelinceye kadar su emdirmek esastır. Bu da doğal taş ile, o taşa emdirilen su arasında bir etkileşim olmasına neden olur. Su doğal taşın yapısal olarak bozunmasına neden olabileceği gibi, numune yüzeyinde yosun oluşması da olası sonuçlar arasındadır. Bunun yanında bir doğal taş örneğinin su bakımından doymun hale gelmesini beklemek oldukça zaman alıcıdır. Bu çalışmada önerilen hava geçirgenlik indeks testinde permeabilite değerinin belirlenmesi için hava kullanıldığından dolayı, hava ile taş örneği arasında herhangi bir etkileşim beklenmez. Test sadece 6 saatte tamamlanır. Numunedeki birbiri ile bağlı gözenek miktarı, gözenek çapı arttıkça test süresi azalabilir.

Elde edilen sonuçlara göre API değerleri ile atmosfer basıncında su emme değerleri arasında oldukça kuvvetli bir ilişki vardır ($R^2= 0.731$) (Şekil 6). Bu durum gözenekliliğin API ile ilişkili olduğunu açıklayabilir. Bunun yanında API değerleri ile görünür yoğunluk değerleri arasındaki ilişkiyi betimleyen determinasyon katsayısı oldukça düşük çıkmıştır ($R^2= 0.315$) (Şekil 11). Bunun nedeni birçok parametre ile ilgili

olabilir. Özellikle yüksek gözeneklilik değerlerine sahip doğal taşlarda hava geçirgenliği yüksek olmasına rağmen görünür yoğunluk düşük olabilir. Tersine de geçerli olabilir, özellikle kil içeren doğal taşlarda gözenekli olan taşlara göre görünür yoğunluk görece yüksek olmasına rağmen, hava geçirgenlik değerleri yüksek olabilir. Bunun yanında Şekil 7'den de görüldüğü üzere görünür yoğunluk değerleri birbirine oldukça yakın değerlerdedir. API değerleri ile açık gözeneklilik değerleri arasındaki ilişki ise oldukça iyi değerdedir ($R^2= 0.69$) bu değer de ölçülen API değerlerinin açık gözenekliliği açıklayabildiğinin bir kanıtıdır.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, doğal yapı taşlarının durabilite değerlerine bir yaklaşım getirebilmek amacıyla modifiye edilmiş yeni bir permeabilite test metodu tanımlanmış ve bu test metoduna ait sonuçlar sunulmuştur. Bu amaçla 16 farklı doğal taş türüne 96 test uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hava geçirgenlik indeksi testi doğal taşların permeabilite değerlerinin belirlenmesinde başarıyla kullanılabilir. Sonuçlar göstermiştir ki hava geçirgenlik değerleri ile atmosfer basıncında su emme ve doğal taş porozite değerleri arasında görece kuvvetli bir ilişki vardır. Literatürde doğal taş gözenekliliğinin belirlenebilmesi için bir çok yöntem mevcuttur. Hava geçirgenlik indeksi testi diğer yöntemlere göre oldukça hızlıdır. Taşın türüne bağlı olmakla birlikte test süresi en fazla 6 saattir. Taşın gözenekliliği arttıkça bu süre azalır. Gözenekli doğal taş örneklerinde gözeneklerin birbiri ile bağlı olup olmadığını belirlemek adına hava geçirgenlik testi başarı ile kullanılabilir. Elde edilen API değerleri, kireçtaşı olarak bilinen doğal yapı taşları için 10-12 arasında değişkenlik göstermektedir. Doğal taş literatüründe ve bu çalışmada genel olarak kireçtaşı mermerlerinin fiziko mekanik özellikleri birbirine oldukça yakın değerlerdedir. Bu çalışmada da literatürü doğrular nitelikte kireçtaşı mermerlerinin API değerleri birbirine oldukça yakın değerlerde çıkmıştır. Taşlarda yapılan genel gözlemler sonucunda gözle görülebilir gözenekliliğe sahip olmayan kireçtaşı mermerleri için API değerlerinin 10-12 arasında çıkması durumu genellenabilir. Ancak jeolojik olarak kireçtaşı olarak tanımlanan ve ticari isimleri Denizli Traverten ve Golden Traverten olan taşlar bu genellemenin dışındadır. Bu iki taşdan Denizli Traverten'de gözle görülebilir gözenekler vardır (API değeri 8.392). Bu durum API değerinin neden düşük olduğunu açıklar. Golden Traverten örneğinde ise

durum oldukça farklıdır. Bu örnekte gözle görülebilir herhangi bir gözenek tespit edilemez, bu taş kireçtaşı olarak tanımlanmasına rağmen ticari ismindeki “traverten” sözcüğü dikkat çekicidir. Golden Traverten örneğinde gözle görülebilir gözeneklilik olmamasına rağmen taş içerisinde hava geçiş miktarı çok kısa sürede olmaktadır. Bu durum taş içerisinde gözle görülemeyen, birbiri ile bağlı çok fazla sayıda gözenek olması durumu ile açıklanabilir. Bu iki örnek için dikkat çekici durum ise gözle görülebilen gözenekliliği çok fazla ve gözenek çapları 2-6 mm olmasına rağmen, Denizli Traverten örneğinin API değerinin Golden Traverten örneğinden daha yüksek çıkmasıdır. Bu durum Denizli Traverten’deki gözeneklerin yüzeyel olması ya da birbirleri ile bağlı olmaması durumu ile açıklanabilir. API testi doğal taşın uygulanacağı yüzey boyunca gözeneklerin birbiri ile bağlı olup olmadığı hakkında fikir vermesi açısından oldukça anlamlı sonuçlar üretmiştir. API test değerlerine göre kireçtaşı mermerlerinin geçirgenliği görece düşüktür. Uygulamada da API değerleri yüksek taşlar dış mekan uygulamalarında kullanılmaktadır. Doğal taşların kullanım yerlerinin seçiminde yüzey geçirgenliğinin bilinmesi oldukça önemlidir. API testi doğal taş örneklerinin yüzey geçirgenliğinin belirlenmesinde, ucuz, hızlı ve güvenilir bir test olarak yeni bir yaklaşım getirebilir niteliktedir.

Doğal taş durabilite özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan yöntemler özel numune hazırlama gerektiren karmaşık proseslerdir. Her bir deney aşamasının zaman alıcı olması ve araştırmacı titizliğine dayalı deney proseslerinin varlığı söz konusu çalışmanın önemini artırmaktadır. Yapılacak çalışma ve oluşturacak deney düzeneği ile doğal taş gözenekliliğinin daha güvenilir ve hata toleransı daha az bir yöntemle belirlenmesi beklenen yararlar arasındadır. Oluşturulacak deney düzeneği ile doğal taş gözenekliliğinin belirlenmesinde kullanılan açık gözeneklilik, su emme gibi uzun ve karmaşık test gereksinimleri bertaraf edilecek ve tek bir deneyden doğal taş durabilite değerinin belirlenmesi ile ekonomiye katkı sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

Aboushook MI, Wakizaka Y, Shinagawa S. 1999. Environmental impact on the durability of some Egyptian and Japanese limestones. 9th Int Congr Rock Mech Paris, Fr; 2:991–6.

Alexander, M.G., Mackechnie, J.R. and Ballim, Y. 2001. Use of durability indexes to achieve durable cover concrete in reinforced concrete structures. *Materials Science of Concrete*. Vol. VI, Ed. J. P. Skalny and S. Mindess, American Ceramic Society, 483–511.

Alexander MG, Ballim Y, Mackechnie JM. 1999. Concrete durability index testing manual' Research Monograph no. 4, Departments of Civil Engineering, University of Cape Town and University of the Witwatersrand.

Anonymous. 1983. The Selection of Natural Stone. Digest 260, Watford: Building Research Establishment, Her Majesty's Stationary Office, London.

ASTM D 4404. 1984. Standard Test Method For Determination Of Pore Volume And Pore Volume Distribution Of Soil And Rock By Mercury Intrusion Porosimetry. ASTM International, August 31.

Bell, F.G. 1980. Engineering Geology and Geotechnics. Newness and Butterworths, London, 497 pp. Sayfa 278

Bell, F.G. 1993. Engineering Geology. Blackwel Scientific Publications, London, 359 pp.

Benavente, D., Garcia del Cura, M.A., Fort, R., Ordonez, S. 1999. Thermodynamic modelling of changes induced by salt pressure crystallisation in porous media of stone. *Journal of Crystal Growth* 204, 168– 178

- Benavente, D., Garcia del Cura, M.A., Bernabeu, A., Ordonez, S. 2001. Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology* 59, 313–325.
- Benavente, D., Garcia del Cura, M.A., Fort, R., Ordonez, S. 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology* 74, 113–127.
- Beushausen, H., Alexander, M.G., Mackechnie, J. 2003. Concrete durability aspects in an international context. *Concrete Plant and recast Technology BFT*, vol. 7, Germany, pp. 22–32.
- Camuffo D. 2004. Carbonate stone: Chemical behaviour, durability and conservation. *Stud Conserv*;45:280–280.
- Doehne, E.F. 2010. Stone conservation: an overview of current research Getty Conservation Institute publications Los Angeles, p158.
- Esbert R.M., Montoto M., Jordaz G. 1991. Rock as a construction material: durability, deterioration and conservation. *Mater. Constr.*;41:61–73.
- Fitzner, B. 1988. Porosity properties of naturally or artificially weathered sandstone. In: Ciabach, J. (Ed.), *Proceedings of the 6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Torun, Poland, pp. 236–245.
- Flatt, R.J. 2002. Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of Crystal Growth* 242, 435–454.
- Gauri, L. K., Bandyopadhyay, K. J. 1999. Carbonate stone: chemical behavior, durability, and conservation, New York : Wiley. p. 284.

- Goudie, A.S., Viles, H.A. 1995. The nature and pattern of debris liberation by salt weathering: a laboratory study. *Earth Surface Processes and Landforms* 20, 437–449.
- Goudie, A.S. 1999. Experimental salt weathering of limestone in relation to rock properties. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 715– 724.
- Goudie, A.S. 1993. Salt weathering simulation using a single-immersion technique. *Earth Surface Processes and Landforms* 18, 368– 376.
- Hall C, Hoff WD. 2002. Water transport in brick, stone and concrete.
- Ingham, J.P. 2005. Predicting the frost resistance of building Stone. *Quarterly Journal Engineering Geology and Hydrogeology*. 38, p. 387-399.
- Jefferson, D.P. 1993. Building stone: the geological dimension. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 26, 305– 319.
- Leary, E. 1986. *The Building Sandstones of the British Isles*. Building Research Establishment, Watford, Her Majesty's Stationery Office, London.
- Mackechnie, J.R. and Alexander, M.G. 2002. Durability predictions using early age durability index testing, *Proceedings, 9th Durability and Building Materials Conference*, Australian Corrosion Association, Brisbane, 11p.
- Nicholson, D.T. 2001. Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestones. *Earth Surface Processes and Landforms* volume 26, 819– 838.
- Ordenez, S., Fort, R., Garcia del Cura, M.A. 1997. Pore size distribution and the durability of a porous limestone. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 30, 221– 230.

- Richardson, B.A. 1991. The durability of porous stones. *Stone Industries* 26 (10), 22–25.
- Scherer, G.W. 1999. Crystallisation in pores. *Cement and Concrete Research* 29, 1347–1358.
- Siegesmund S, Dürrast H. 2011. Stone in Architecture: Properties, Durability. In: Siegesmund S, Sneath R, editors., New York: Springer London; p. 545.
- Sims, I. 1991. Quality and durability of stone for construction. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.24(1), p.67-73.
- Sperling, C.H.B., Cooke, R.U. 1985. Laboratory simulation of rock weathering by salt crystallisation and hydration processes in hot, arid environments. *Earth Surface Processes* 10, 541– 555.
- Streicher, P.E. and Alexander, M.G. 1995. A chloride conduction test for concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(6), pp. 1284–1294.
- Uyanık T. (2008). Doğal Taşlar, T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi Raporu.
- Valdeon, L., Freitas, M.H., King, M.S. 1996. Assessment of the quality of building stones using signal processing procedures. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 29, 299–308.
- Vázquez P, Alonso FJ, Carrizo L, Molina E, Cultrone G, Blanco M. 2013. Evaluation of the petrophysical properties of sedimentary building stones in order to establish quality criteria. *Constr Build Mater.*; 41:868–78.
- Winkler, E.M. 1973. *Stone Properties, Durability in Man's Environment*. Springer-Verlag, New York.

Xeidakis GS, Samaras IS. 1980. Durability of a sandstone used as a principal building and decorative material in Ancient Abdera, Xanthi, N. Greece. *North*;54:137–47.

Yurdakul, M. 2010. Karbonat Kökenli Doğal Taşların Yapay Sinir Ağları ile Kesilebilirlik Tayini. Yayımlanmamış doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.