

# CivilTech

International Symposium on Innovations in  
Civil Engineering and Technology

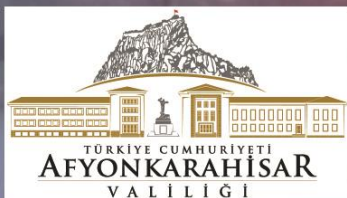
**23-25 OCTOBER 2019**  
**AFYONKARAHİSAR-TURKEY**

**BOOK OF PROCEEDINGS**

**VOLUME I**

**EDITORS**

**Hüseyin AKBULUT**  
**Cahit GÜRER**  
**Gökhan GÖRHAN**  
**Gökhan KÜRKLÜ**  
**B. Enis KORKMAZ**



**1<sup>st</sup> International Symposium on  
Innovations in Civil Engineering  
and Technology**

**I CIVILTECH 2019**

**BOOK OF PROCEEDINGS**

**VOLUME 1**

**Afyonkarahisar  
October 23-25, 2019**

# BOOK OF PROCEEDINGS

First International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology  
(1ST I CIVILTECH)

**THEME:** Innovations in Civil Engineering and Technology

**PUBLISHER:** Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

**EDITED BY:** Hüseyin AKBULUT, Cahit GÜRER, Gökhan GÖRHAN, Gökhan KÜRKLÜ and Burak Enis KORKMAZ

**COMPILATION BY:** Şule YARCI, Süleyman GÜCEK, Ayfer ELMACI and Merdan Törehan TURAN

**PLACE OF PUBLICATION:** Afyonkarahisar - TURKEY

**DATE:** 16.12.2019

**VOLUME:** 1

**ISBN:** 978-605-031-372-7

**COPYRIGHT:** This work is subject to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned. Nothing from this publication may be translated, reproduced, stored in a computerized system or published in any form or in any manner, including, but not limited to electronic, mechanical, reprographic or photographic, without prior written permission from the publisher [www.iciviltech.com](http://www.iciviltech.com) [s.iciviltech@gmail.com](mailto:s.iciviltech@gmail.com). The individual contributions in this publication and any liabilities arising from them remain the responsibility of the authors. The publisher is not responsible for possible damages, which could be a result of content derived from this publication.



## Investigation of Effect of Surface Protection Chemical on Water Vapor Transmission of Döğer Tuff (İhsaniye-Afyonkarahisar) Used as Building Stone

Mustafa Yavuz Çelik<sup>\*1</sup>, Zeyni Arsoy<sup>2</sup>, Murat Sert<sup>3</sup>

*\*Corresponding author's email address  
(mycelik@hotmail.com; mycelik@aku.edu.tr)*

### Abstract

In this study, the changes in water vapour transmission properties as a result of coating of Doger tuffs produced in Afyonkarahisar with water repellent chemicals were investigated. Firstly, mineralogical - petrographic (polarizing microscope, XRD), chemical analysis (XRF), pore diameter distribution and some physico - mechanical properties of the other tuff were determined. In the second stage, the water vapour transmission properties of Doger tuffs were determined and the same experiment was repeated on Döğer tuffs where water repellent and protective chemicals were applied. In the water vapour transmission test of the other tuff samples, the mass weight loss was found to be 0.59% in normal tuffs and 0.25% in protective tuffs.

**Keywords:** Doger tuff, building stone, deterioration, water vapor transmission, surface protection chemical.

## Yapı Taşı Olarak Kullanılan Döğer (İhsaniye-Afyonkarahisar) Tüfünün Su Buharı Geçirgenliğine Koruyucu Kimyasal Madde Etkisinin İncelenmesi

### Özet

Bu çalışmada Afyonkarahisar'da üretilen Döğer tüfünün su itici kimyasal madde ile kaplanması sonucunda su buharı aktarım özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Bu doğrultuda ilk olarak döğer tüfünün mineralojik - petrografik (polarizan mikroskop, XRD), kimyasal analiz (XRF), gözenek çapı dağılımı ve bazı fiziko-mekanik özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise Döğer tüfünün su buharı aktarım özellikleri belirlenmiş ve aynı deney su itici ve koruyucu kimyasal maddelerin uygulandığı Döğer tüfü üzerinde de tekrarlanmıştır. Döğer tüfü örneklerinin su buharı aktarım

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksek Okulu, Doğal Yapı Taşları Programı, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye (speaker author)

<sup>3</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

deneyinde kütle ağırlık kaybı normal tüflerde %0,59 iken koruyuculu tüflerde bu oran %0,25 olarak belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Döğer tüfü, yapı taşı, ayrışma, Su buharı geçirgenliği, koruyucu kimyasal madde.

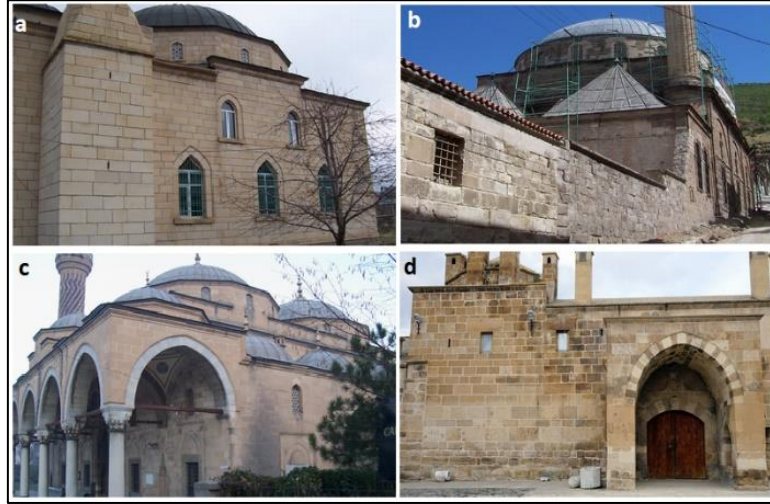
## 1. Giriş

Doğal yapı taşları binlerce yıldır yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Dünyadaki günümüze kadar gelebilen kültürel mirasın önemli bir kısmının inşasında doğal taşlar tercih edilmiştir. Bu tercihe, doğal yapı taşlarının dayanıklı olmasının yanı sıra güzel renk ve estetik görünümü de etkili olmuştur. Tarihi yapılarda kullanılan doğal yapı taşları, atmosfer ve çevresel etkilere bağlı olarak yavaş ama kaçınılmaz bir şekilde ayrışmakta ve zaman içerisinde yok olmaktadır [1]. Bu nedenle, yeri doldurulamaz bu taş yapılar ve anıtların kültürel değerlerini ve bütünlüklerini mümkün olduğunca uzun süre korumak için önlemler alınmalıdır.

Tarihi yapılarda kullanılan yapı taşlarından birisi de tüflerdir. Tüfler, volkanik olaylar sırasında katı halde dışarı püsküren tane boyutu 2 mm'nin altında volkan camı parçaları, kristal taneleri ve kayaç parçaları gibi piroklastik malzeme içermektedir. Bu nedenle tüfler bileşimlerine göre vitrik, litik ve kristal tuf olarak adlandırılmaktadır. Türkiye'de, Neojen ve Kuvaterner döneminden tarihsel çağlara kadar oldukça şiddetli ve yaygın volkanik faaliyetler meydana gelmiştir. Bu volkanik faaliyetler sonucunda Anadolu'nun yaklaşık %10'unu kaplayan lav, tuf, aglomeralar gibi volkanik kayaçlar oluşmuştur. Tüfler, Batı ve Orta Anadolu'da çok geniş alanlar kaplamaktadır. Günümüzde Foça, Çeşme, Çanakkale, Afyon, Nevşehir tüfleri ekonomik olarak işletilmekte ve kullanılmaktadır [2].

Afyonkarahisar yöresinde, Frig döneminden beri gerek yerleşim yeri olarak gerekse anıtsal ve dini yapılarda olmak üzere tüfler yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Tarih boyunca farklı kültürleri ve manevi inanışları temsil eden ibadet yapıları gibi anıtsal yapılar, korunması gereken kültür varlığı olarak önemli mimarlık yapılarıdır. Afyonkarahisar şehir merkezinde de Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinden günümüze kadar gelen tarihi camiler hala mevcudiyetlerini sürdürmektedir. Bu camiler daha çok, Afyonkarahisar civarında bol olarak bulunan tuf, trakit ve andezit gibi volkanik kayaçlardan inşa edilmiştir. Afyonkarahisar yöresinde Döğer tüfleri kullanılarak inşa edilen en önemli tarihi yapılar; Döğer Kervansarayı (1440), İmaret Cami (1472) ve Mevlevi Türbe Cami (1905) sayılabilir (Şekil 1). Bu tarihi yapılarda zaman içerisinde meydana gelen tahribatın giderilmesi ve işlevini sürdürebilmesi amacıyla zaman zaman restorasyon çalışmaları yapıldığı bilinmektedir.

Günümüzde de Ayazini, Seydiler ve Döğer yörelerinde tuf ocakları işletilmekte ve üretilen bu tüfler bölgede yapı taşı olarak kullanılmaktadır. Özellikle Döğer tüfleri bina yapımının yanı sıra güncel cami yapımında kullanılan en önemli yapı malzemelerinden birisidir. Tuf gibi çok gözenekli olan ve kolay ayrışma özelliği gösteren yapı taşlarının kullanım alanlarında daha uzun süreler dayanabilmesi için atmosfer ve çevresel etkilere karşı duyarlılıklarının bilinmesi gereklidir.



Şekil 1. Döğer tufünün kullanıldığı güncel ve tarihi yapılar a) Çakır köyü Cami (1970), b) Mevlevi Türbe Cami (1905), c) İmaret Cami (1472), d) Döğer kervansarayı (1434).

Gerek tarihi yapılarda gerekse güncel yapılarda kullanılan bu tüflerin ayrışmasındaki en önemli etkenlerden birisi sudur. Su ile temas eden bir yapı taşı, suyu kılcal yollarla bünyesine alabilmektedir. Yapı taşı içerisine giren su nedeniyle malzemenin ısı da değişmektedir. Isı ve su içeriğine bağlı bu değişim, malzemede büzülme ve şişme gibi hacimsel deformasyonların meydana gelmesine yol açmaktadır. Bu deformasyonlar, malzemenin yapısal ve dokusal özelliklerine bağlı olarak zamanla mikro çatlakların gelişmesine yol açmaktadır. Bu mikro çatlaklar yoluyla suyun malzeme içerisine girmesi ve hareket etmesi daha kolay olmaktadır.  $3,5 \text{ A}^\circ$  büyüklüğünde olan su molekülleri, yapı taşı içindeki kendinden daha büyük olan gözenek ve mikro çatlaklara kolaylıkla girmekte ve birbirleriyle bağlantılı olan bu boşluklar içinde rahatlıkla hareket etmektedir [3].

Yapı taşlarında meydana gelen ayrışma, bulunduğu çevrenin iklimsel özellikleri birinci derecede ilişkilidir. Nemli ve sıcak bölgelerde kimyasal ayrışma olurken soğuk ve kurak bölgelerde ise fiziksel ayrışma ön plandadır. Kimyasal ayrışma daha hızlı gelişirken fiziksel ayrışma daha yavaştır. Ayrışmada yapı taşının yapısal ve mineralojik özellikleri de etkilidir. Sert taşlar zor ayrışırken yumuşak taşlar daha kolay ayrışmaktadır [4].

Yapı taşı içerisine giren suyun sıcaklık nedeniyle buharlaşması veya buhar halinde malzemeye ulaşması yoğuşmaya bağlı olarak çeşitli ayrışmalara yol açmaktadır. Ayrışmanın niteliği, sıcaklık ve nemin miktarı ile ilişkilidir. Sıcaklığa bağlı olarak artan buhar basıncı nedeniyle ortaya çıkan kondansasyon (buhar geçirimsizliği), yapı taşının iç yapısını veya yüzeyini etkilemektedir [5]. Bu nedenle yapı taşlarının ısı performansları büyük önem taşımaktadır. Özellikle binalarda dış duvar kaplaması olarak kullanılan doğal taşların yoğuşma hesabının yapılabilmesi için bu malzemelerin su buharı difüzyon özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir [6].

Su buharı geçirgenliği, su buharının yapı taşları içinden geçmesine izin veren önemli bir fiziksel özelliktir. Bu nedenle, restorasyon ve konservasyonda sağlamaştırma (konsolidasyon), yüzey koruma ve su itici amaçlı kullanılan kimyasal maddeler, su buharı difüzyonuna karşı bir engel görevi görmemelidir [7]. Yüzey koruma işleminden kaynaklanan su buharı geçirgenliğindeki önemli bir düşüş, taş içindeki su buharının sıkışmasına neden olabilir ve böylece yapı taşlarında oluşan hasar, özellikle donma-çözülme hasarı riski artabilir [8].

Değişik yapı taşlarının su buharı geçirgenliği üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır. Beck vd. [9], Fransa Loire vadisindeki yapı malzemesi olarak kullanılan tüflerin karakterizasyonunu yaparak, su transfer



özellikleri ve tüflerdeki ayrışmayı, Atmaca ve Kargıcı [10], Konya'da kış aylarında yapı malzemelerinde oluşan buhar geçişini, Mukhopadhyaya vd. [11], yapı malzemelerinin su buharı ve hava geçirgenliği arasındaki korelasyonu, Nakabayashi vd. [12], klorür tuzlar ile emprenye edilmiş doğal gözenekli malzemenin su buharı adsorpsiyon kabiliyetini, Ertaş [13], buhar fazındaki nemin bina içindeki oluşumunu, hareketini, zararlarını ve engellenmesini, Yu, ve Zhang [14], gözenekli yapı malzemelerinin hidrotermal karakterizasyonu ve su buharı iletim yöntemini, Vejmelková vd. [15], yapı taşlarının mekanik, higroskopik ve ısı özelliklerini, D'Orazio ve Munafò [16], konsolide edilmiş taşların higrometrik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir.

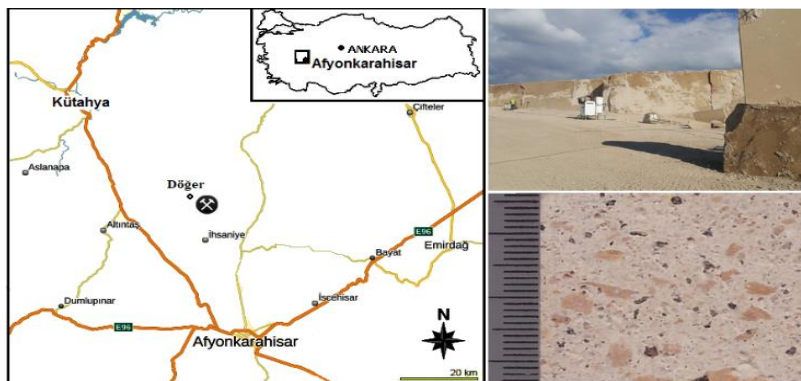
Gündüz vd. [6], bazı mermerlerin su buharı difüzyon karakteristiklerini açıklamışlardır. Pavlık vd. [17], gözenekli yapı malzemelerinde su buharı adsorpsiyonunun deneysel ölçme ve teorik analizini yapmışlardır. Togkalidou vd. [18], doğal ve yapay yapı malzemelerinin çeşitli mikro yapı parametreleri ile su buharı geçirgenliğini karşılaştırmışlardır. Keppert vd. [19], difüzyon direnci faktörünün kumtaşı toplam gözenekliliği ile ilişkili olduğunu ancak sorpsiyon davranışının, kumtaşının spesifik yüzey alanı ve kil matrisinin varlığına bağlı olduğunu bildirmişlerdir. López vd. [20], doğal yapı taşları ve kireç harcının higrotermal özelliklerini belirlemek için yapılan laboratuvar deneylerinin sonucunda test numunesinin boyutlarının buhar difüzyon direnci faktörünü etkilediğini belirtmişlerdir.

Afyonkarahisar yöresinde geçmiş tarihlerden beri yapı taşı olarak kullanılmakta olan Döğer tüfleri, çok gözenekli bir yapı taşıdır. Gözenekliliğin, su emme özelliklerini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Yapı taşlarının karakterizasyonu ve bu özelliklerinin ayrışma ile ilişkisinin tanımlanması ve miktarının belirlenmesi, bozulma nedenlerinin ve mekanizmalarının anlaşılması gerekmektedir. Bu çalışmada restorasyon ve konservasyon çalışmalarında da kullanılan Döğer tüflerinin su buharı geçirgenliği incelenmiştir. Bu amaçla normal ve yüzey koruyucu kimyasal madde ile kaplanmış tüf örnekleri de kullanılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Materyal

Deneylerde Afyonkarahisar yöresinde yapıtaşı olarak kullanılan Döğer tüfleri kullanılmıştır. Bu tüf örneklerinin alındığı taş ocaklarının lokasyon haritası Şekil 2'de verilmiştir. Tüf ocağından alınan bloklardan, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksekokulu Mermer Atölyesinde, fiziko-mekanik deneyler için standartlarda öngörülen boyutlarda örnekler (50x50x50 mm) elde edilmiştir. Su buharı aktarım özelliklerinin belirlenmesi deneyi için ise örnekler 160x160x10 mm ebatlarında kesilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan Döğer tüfünün çıkarıldığı ocağın lokasyon haritası, ocağın ve tüfün yüzey görünümü

Su buharı aktarım özelliklerinin belirlenmesi deneyinde %85 saflıkta KCl (potasyum klorür) çözeltisi kullanılmıştır. Yüzey koruyucu olarak Teknosil marka şeffaf, siloksan esaslı, solvent bazlı ticari kimyasal madde kullanılmıştır. Örnekler yıkanıp kurutulduktan sonra yüzeyine fırça ile tüm yüzeylere bir kat olarak yüzey koruyucu kimyasal madde uygulanmıştır. Yüzey koruyucu uygulanmış olan örnekler, polimerizasyon işlemi sağlaması için 48 saat bekletildikten sonra deneylerde kullanılmıştır. Deneyler iklimlendirme kabininde yürütülmüştür.

## 2.2. Yöntem

Döğür tüflerinin yoğunluk, su emme, gözenek, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde kullanılan standartlar Tablo 1’de verilmiştir. Deneyde kullanılan tüflerin su buharı geçirgenliğine etki eden en önemli özelliklerden birisi de gözenek boyutu ve dağılımıdır. Bu amaçla tüf örneklerinin gözenek boyut dağılımları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) cıvalı porozimetre Micromeritics Auto Pore IV 9500 cihazında belirlenmiştir. Deneyler sonrası tüflerde meydana gelen tuz birikimleri ve ayrışmanın belirlenmesi amacıyla SEM analiz için örnekler karbonla kaplanmış ve Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan LEO 1430 VP model SEM cihazı ile incelenmiştir.

Tablo 1. Tüf örneklerinin fiziksel ve mekanik testlerinde kullanılan ilgili standartlar.

Testler	İlgili standart
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	TS EN 1936 [21]
Ağırlıkça su emme (%)	TS EN 13755 [22]
Gözeneklilik (%)	TS EN 1936 [21]
Ultrasonik dalga hızı (km/s)	TS EN 14579 [23]
Basınç dayanımı (MPa)	TS EN 1926 [24]

### 2.2.1. Su Buharı Aktarım Özelliklerinin Belirlenmesi Deneyi

İzotermal koşullar altında binalarda kullanılan ürünlerin su buharı geçirgenliğinin (permeability) ve su buharı geçirimsizliğinin (permeance) belirlenmesine yönelik kap deneyleri (cup test) yapılmaktadır. Çalışmada kullanılan tüf örneklerinin su buharı aktarım deneyleri TS EN ISO 12572 [25] standardına göre yapılmıştır.

Deneylerde 160x160x10 mm boyutlarında 3 adet normal, 3 adet koruyucu kimyasal madde sürülmüş tüf örneği kullanılmıştır. Deney örneğiyle, kurutucu (kuru kap) veya sulu doymuş solüsyon (ıslak kap) içeren bir deney kabının açık tarafına sızdırmazlık sağlanmıştır. Daha sonra bu tertibat, ısı ve nem kontrollü deney kabinine yerleştirilmiştir. Deney kabı ile kabin arasındaki farklı buhar basıncı dolayısıyla, geçirgen örneklerden geçen bir buhar akışı meydana gelmektedir. Sabit durumda su buharı iletim hızını belirlemek için tertibat periyodik olarak tartım yapılmıştır. Deney örneklerinin görünümü ve deneye hazırlama aşamaları Şekil 3’te verilmiştir.

Deneylerde %85’lik potasyum klorür (KCl) çözeltisi kullanılmıştır. Sıvı solüsyonu her bir kabin dibine minimum 15 mm’lik bir derinlik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deney örneklerinin yerleştirildiği kap, standartlarda istenilen teknik kullanılarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Sıvı solüsyon ile örnek arasındaki hava boşluğu (15±5) mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Deney için sıcaklık, nem ve döngü ayarları istenildiği gibi ayarlanabilen iklimlendirme kabini kullanılmaktadır. Öncelikle örnekler birbirini izleyen üç günde ayrı ayrı belirlenen ağırlıklarının %5’lik bir oran dahilinde birbiriyle tutarlı olması için, ağırlıkları stabilize olacak kadar uzun bir süre boyunca 23±5 °C sıcaklık ve %50±5 bağıl nemde bekletilir. Sonrasında aşağıdaki Tablo 2’de verilen "Islak Hal" sıcaklık ve nem değerlerinde



(Her biri 6'şar saat) 1 hafta boyunca bekletilir. Bir hafta sonrasında örnekler iklimlendirme kabininden çıkartılarak tartımları alınır. Su buharı aktarım değerleri hesaplanır.



Şekil 3. Su buharı aktarım özelliklerinin belirlenmesi deney örneklerinin görünümü ve deneye hazırlama aşamaları

Tablo 2. Su buharı aktarım özelliklerinin belirlenmesi deney şartları

Ayar	Koşul °C- %RH	Sıcaklık °C	Toleranslar			
			Bağıl nem %			
			Kuru hal		Islak hal	
			Ayar noktası	Tolerans	Ayar noktası	Tolerans
A	23 – 0/50	23±0,5	0	+3	50	±3
B	23 – 0/85	23±0,5	0	+3	85	±3
C	23 – 50/93	23±0,5	50	±3	93	±3
D	38 – 0/93	38±0,5	0	+3	93	±3

Bu standart kapsamında örneklerin, su buharı akış hızı (mg/saat), su buharı geçirgenlik hızı (mg/m<sup>2</sup>.h), su buharı geçirgenliği (mg/m<sup>2</sup>.Pa), su buharı difüzyon direnci faktörü (μ) değerleri belirlenmektedir.

Kütle değişimi (mg/h) (Δm<sub>1,2</sub>), Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$\Delta m_{1,2} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Δm<sub>1,2</sub>: Her bir deney örneğinin kütleindeki değişim (kg/h), m<sub>1</sub>: deney düzeneğinin t<sub>1</sub> zamandaki kütlesi (mg), m<sub>2</sub>: deney düzeneğinin t<sub>2</sub> zamandaki kütlesi (mg), t<sub>1</sub> ve t<sub>2</sub>: birbirini izleyen tartım zamanları (h)

Su buharı geçirgenlik hızı (mg/m<sup>2</sup>.h), Eşitlik 2'ye göre hesaplanmıştır.

$$g = \frac{G}{A} \quad (2)$$

g: su buharı geçirgenlik hızı (mg/m<sup>2</sup>.h), G: örneğin kütleindeki değişim (mg/h), A: örneğin açıkta kalan alanı (m<sup>2</sup>)

Su buharı geçirgenliği ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{Pa}$ ), Eşitlik 3'e göre hesaplanmıştır.

$$W = \frac{G}{A \Delta p} \quad (3)$$

W: su buharı geçirgenliği ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{h.Pa}$ ), G: örneğin kütledeki değişim ( $\text{mg}/\text{h}$ ), A: deney parçasının açıkta kalan alanı ( $\text{m}^2$ ),  $\Delta p$ : Su buharı basınç farkı ( $\text{Pa}$ )

Su buharı direnci ( $\text{m}^2.\text{h.Pa}/\text{mg}$ ), Eşitlik 4'e göre hesaplanmıştır.

$$Z = \frac{1}{W} \quad (4)$$

Z: su buharı direnci ( $\text{m}^2.\text{h.Pa}/\text{mg}$ ), W: su buharı geçirgenliği ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{h.Pa}$ )

Su buharı özgeçirgenliği ( $\delta$ ), Eşitlik 5'e göre hesaplanmıştır.

$$\Delta = W.d \quad (5)$$

$\delta$ : su buharı özgeçirgenliği ( $\text{mg}/\text{m}.\text{h.Pa}$ ), W: Su buharı geçirgenliği ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{h.Pa}$ ), d: örnek kalınlığı ( $\text{m}$ )

Su buharı difüzyon direnci faktörü ( $\mu$ ), Eşitlik 6'ya göre hesaplanmıştır.

$$\mu = \frac{\delta_h}{\delta} \quad (6)$$

$\mu$ : Su buharı difüzyon direnci faktörü,  $\delta$ : su buharı özgeçirgenliği ( $\text{mg}/\text{m}.\text{h.Pa}$ ),  $\delta_{\text{hava}}$ : havanın su buharı özgeçirgenliği (deney sırasındaki ortalama barometrik basınca bağlıdır).

### 3. Bulgular ve Tartışmalar

#### 3.1. Fiziko-mekanik Özellikleri

Döğer tüfü, yüksek gözeneklilik değerine sahiptir. Gözeneklilik değeri yüksek olan taşlar yüksek su emme değeri verirken daha düşük yoğunluk, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımına sahiptir. Deneyler sonucunda tüflerin toplam gözenekliliği %42,03, su emme %20,49 olarak belirlenmiştir.

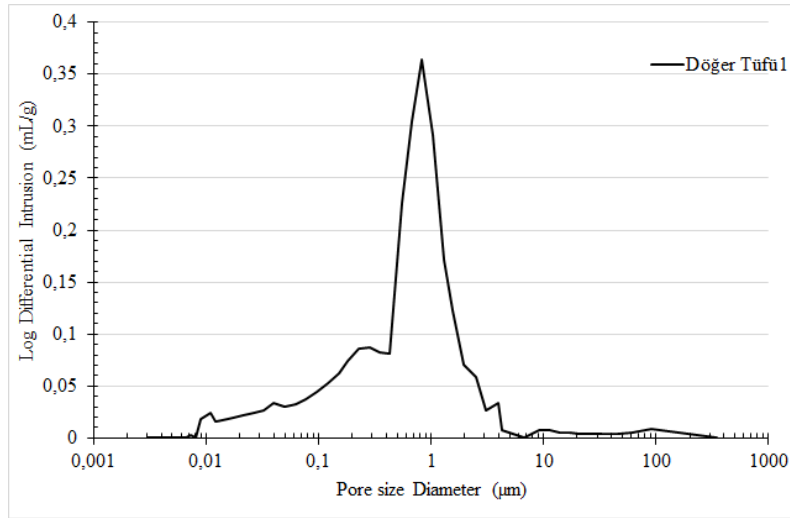
Tablo 3. Döğer tüflerinin fiziko-mekanik özellikleri

	min	max	ort
Yoğunluk (gerçek) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2557	2567	2561
Ağırlıkça su emme (%)	20,15	20,91	20,49
Açık gözenek (%)	25,33	27,11	26,12
Toplam gözenek (%)	42,14	42,90	42,03
Ultrases dalga hızı ( $\text{km}/\text{s}$ )	2,590	2,304	2,441
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	20,69	29,73	25,58

#### 3.2. Gözenek Boyut Dağılımı

Doğal taşların ayrışma mekanizmaları ile doğrudan ilişkili olan gözenek boyut dağılımı önemli bir fiziksel parametredir. Donma-çözülme, su emme, kılcal su emme ve tuz kristallenme olaylarının su emme ile ilişkili olduğu düşünüldüğünde gözenek boyut dağılımının önemi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle deneylerde kullanılan tüflerin gözenek boyut dağılımı cıvalı porozimetre yöntemiyle

belirlenmiş olup elde edilen grafik Şekil 4'te verilmiştir. Döğer tüflerinin gözeneklilik oranı %42,03 olup 0,01-0,8 µm arasında bir gözenek boyut aralığı göstermektedir. Döğer tüfleri, unimodal dağılım (tek doruklu) bir dağılım sergilemektedir. Bu durumda Döğer tüflerinin mikro gözenek çapı dağılımına sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4. Döğer tüfünün gözenek boyut dağılımı.

### 3.3. Su Buharı Difüzyonu

Bir kayanın gaz geçirgenliği, ıslak gözenekli yüzeyin kuruması için önemli bir özelliktir. Tamamen ıslak bir malzemenin kurutma işleminin başlangıcında kılcallık önemli bir rol oynar. Daha fazla kurutma, sahadaki çevresel koşullara bağlı olan denge nemi içeriğine ulaşıncaya kadar su buharı difüzyonu ile karakterize edilir ve belirlenir. Bu nedenle, su buharı difüzyonu, yapı taşının dayanıklılığı için büyük önem taşımaktadır [26, 27].

Su buharı difüzyon direnci ( $\mu$  değeri), gözenekli bir malzemenin bitişik havanın nemine karşı difüzyon direnci hakkında bilgi sağlar. Kılcal su emiliminin yanı sıra  $\mu$  değeri, hidrofobik ajanlarla malzeme yüzeyinin kaplanması değerlendirilmesinde kullanılan en önemli parametredir.  $\mu$  değeri, bir malzemenin gerçek difüzyon katsayısı ile aynı sıcaklıktaki aynı kalınlıktaki statik hava katmanının difüzyon katsayısı arasındaki oranından hesaplanır. Bu nedenle, su buharı difüzyon direncinin sayısı, bir yapı malzemesinin difüzyon direncinin ne kadar yüksek olduğuna, aynı kalınlıktaki statik hava katmanına kıyasla doğrudan bir sayısal değer sağlar. Havanın  $\mu$  değeri 1'dir [27].

Su buharı difüzyonu nedeniyle oluşan yoğuşma, yapı malzemelerinin ısı geçişine olumsuz yönde etki etmektedir. Yapı malzemelerinde kışın ortaya çıkan yoğuşma ya da terleme; yapı malzemesi yüzey sıcaklığının, havanın çiy noktası sıcaklığının altına düşmesiyle oluşmaktadır. Su buharı, yapı malzemesi yüzeyinde yoğuşmazsa, terleme olmadan yapı malzemesi içerisine girmektedir. Malzeme içinde yoğuşan su nedeniyle malzemenin nem oranı artmaktadır. Yoğuşan suyun miktarı, malzemenin absorbe edebileceğinden fazla ise serbest kalır ve malzeme içinde hareket etmeye başlar. Yoğuşma, malzemenin yapısını bozarak ayrışmasına yardımcı olurken malzemenin toplam ısı transferi katsayısını yükselterek ısı kayıplarını artırır [28].

İki veya daha fazla gazdan oluşan bir karışım, birbiriyle irtibatlı iki ayrı ortamda bulunduğu, bu iki gaz arasında konsantrasyonlar eşit oluncaya kadar molekül alışverişi devam eder (Dalton Kanunu). Bu olaya difüzyon (aktarma, geçiş veya yayılma) denir. Nemli hava da bir çeşit gaz karışımıdır. Bu nedenle nemli hava, birbiriyle irtibatlı iki ayrı ortamda bulunduğu içindeki su

buharı konsantrasyonu eşitleninceye kadar iki ortam arasında su buharı molekülü geçişi olur. Difüzyon olayında temel itici güç, karışımı oluşturan gazların kısmi basınç farklarıdır (konsantrasyon farkları) [13].

Buhar akımının geçişi, malzemelerin kendi buhar geçirimsizlik (difüzyon) özelliğine ve buhar akış yoğunluk değerlerine bağlıdır. Literatürde difüzyon özelliği yerine, çoğu uygulamalarda difüzyon direnç katsayısı ( $\mu$ ) değeri kullanılmaktadır. Malzemede meydana gelen buharın su haline dönüşmesi (yoğuşma) malzeme yüzeyinde gözle görülür halde “terleme” veya malzeme içinde gizli olarak “yoğuşma – kondansasyon” şeklinde ortaya çıkmaktadır. Malzeme yüzeyinde görülen terleme ise, ortamın iç sıcaklığı ve bağıl nem miktarına bağlıdır. Eğer, ortam iç sıcaklığı ile malzeme yüzey sıcaklığı arasındaki fark olan soğuma derecesi artarsa, terleme ortaya çıkar [6].

Bir malzemenin su buhar akış yoğunluğu (su buharı geçirgenlik hızı) ne kadar büyük ise, o kadar daha iyi difüzyon yapma yeteneğine sahiptir. Diğer bir deyişle, su buharı akış yoğunluğu ne kadar büyük bir değer ise, o malzeme o kadar nefes alabilirliğine imkân sağlıyor anlamına da gelmektedir [6]. Yapı taşının su buharı geçirgenliği ile ilgili başarılı yüzey koruma işlemlerine duyulan gereksinim, su buharı difüzyon direncindeki ( $\mu$  değeri) artışın %20’den düşük olması gerektiği anlamına gelir [29, 30]. Bu değer, bilimsel çalışmalara değil, genel deneyimlere dayanmaktadır. Difüzyon direnç değerindeki %20’nin altındaki oranlar çoğunlukla bir taşın doğal varyasyon aralığında bulunur ve bu nedenle kabul edilebilir [31].

### 3.4. Su Buharı Geçirgenliği Deneyi Sonuçları

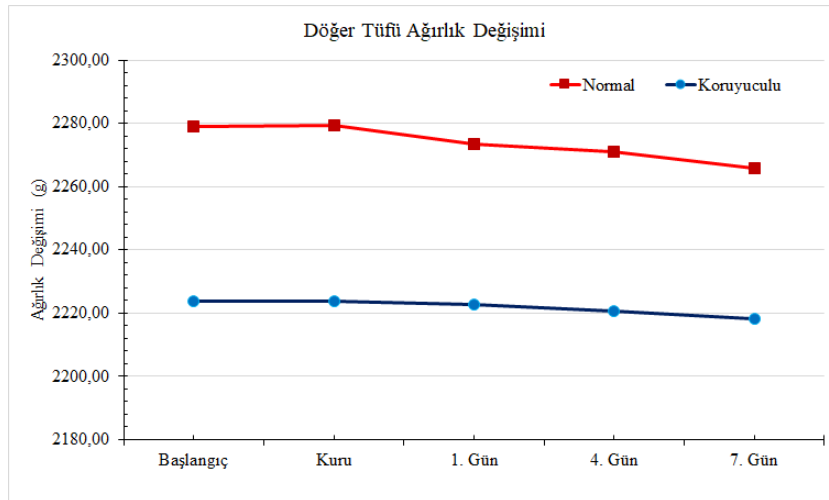
Yapı taşı olarak kullanılan tufün su buharı aktarım özellikleri TS EN ISO 12572 [25] standardına göre belirlenmiş olup normal tüflere ait sonuçlar Tablo 4’de, koruyucu kimyasal madde sürülmüş tüflerde elde edilen sonuçlar ise Tablo 5’de verilmiştir. Su buharı aktarım deneyinde tuf örneklerinin kütle ağırlık değişim miktarı Şekil 5 ve %’si grafiği Şekil 6’da verilmiştir. Su buharı aktarım deneyinde tuf örneklerinin kütle ağırlık değişimleri normal tüflerde %0,59, koruyucu sürülmüş tüflerde ise %0,25 artmıştır. Bu artışın nedeni gözeneklere giren su buharının yoğuşması neticesinde ortaya çıkan sudur. Koruyucu sürülmüş örneklerde kütle artışı normal tüflere göre %70 oranında daha az gerçekleşmiştir.

Tablo 4. Normal tufün su buharı aktarımı deney sonuçları

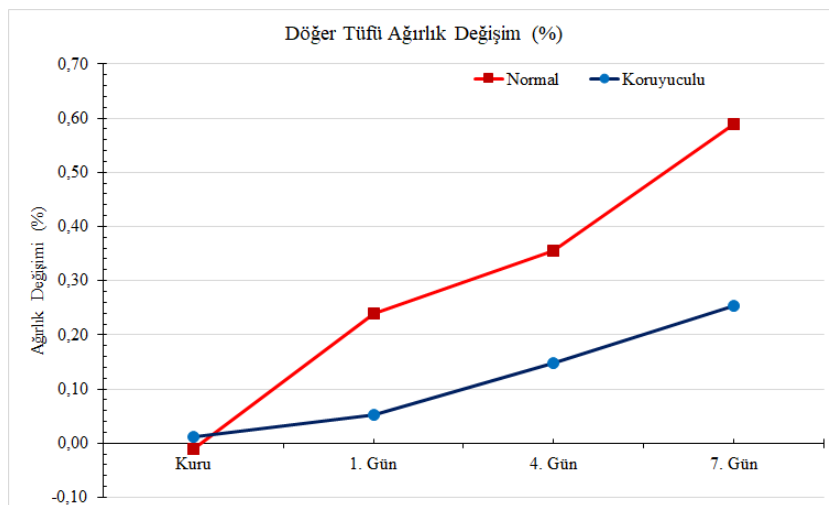
Numune Boyutları (mm)	160x160x10	160x160x10	160x160x10
Numune Ağırlığı (g)	449,72	451,9	439,56
Su Hacmi (ml)	700	700	700
Kabın Ağırlığı (g)	1129,51	1118,51	1135,06
Su+Numune+Kap Ağırlığı (g)	2268,02	2291,49	2277,59
1. Tartım kuru	2271,22	2291,29	2275,37
2. Tartım 1. gün	2265,64	2280,55	2274,57
3. Tartım 4. gün	2267,56	2276,66	2268,65
4. Tartım 7. gün	2266,62	2270,94	2259,54
5. Tartım 10. gün			
Su Buharı Akış Hızı (mg/h)	5,83	84,79	75,21
Ortalama Sonuç (mg/h)		55,28	
Su Buharı Geçirgenlik Hızı (mg/m <sup>2</sup> .h)	277,45	4032,90	3577,09
Ortalama Sonuç (mg/h)		2629,15	
Su Buharı Geçirgenliği (mg/m <sup>2</sup> .Pa)	9,63	137,01	121,53
Ortalama Sonuç (mg/h)		89,39	
Su Buharı Difüzyon Direnci Faktörü ( $\mu$ )	4,46	0,32	0,33
Ortalama Sonuç (mg/h)		1,70	

Tablo 5. Kimyasal koruyucu sürülmüş tüfün su buharı aktarımı deney sonuçları

Numune Boyutları (mm)	160x160x10	160x160x10	160x160x10
Numune Ağırlığı (g)	387,94	324,86	468,54
Su Hacmi (ml)	700	700	700
Kabın Ağırlığı (g)	1134,67	1128,18	1129,55
Su+Numune+Kap Ağırlığı (g)	2214,04	2150,62	2306,97
1. Tartım kuru	2217,99	2151,27	2301,59
2. Tartım 1. gün	2213,82	2147,58	2306,75
3. Tartım 4. gün	2214,32	2143,15	2304,27
4. Tartım 7. gün	2213,23	2140,32	2301,25
5. Tartım 10. gün			
Su Buharı Akış Hızı (mg/h)	3,37	62,92	23,83
Ortalama Sonuç (mg/h)		30,04	
Su Buharı Geçirgenlik Hızı (mg/m <sup>2</sup> .h)	160,52	2041,22	1133,57
Ortalama Sonuç (mg/h)		1111,77	
Su Buharı Geçirgenliği (mg/m <sup>2</sup> .Pa)	5,45	69,35	38,51
Ortalama Sonuç (mg/h)		37,77	
Su Buharı Difüzyon Direnci Faktörü ( $\mu$ )	0,97	0,92	1,10
Ortalama Sonuç (mg/h)		1,00	



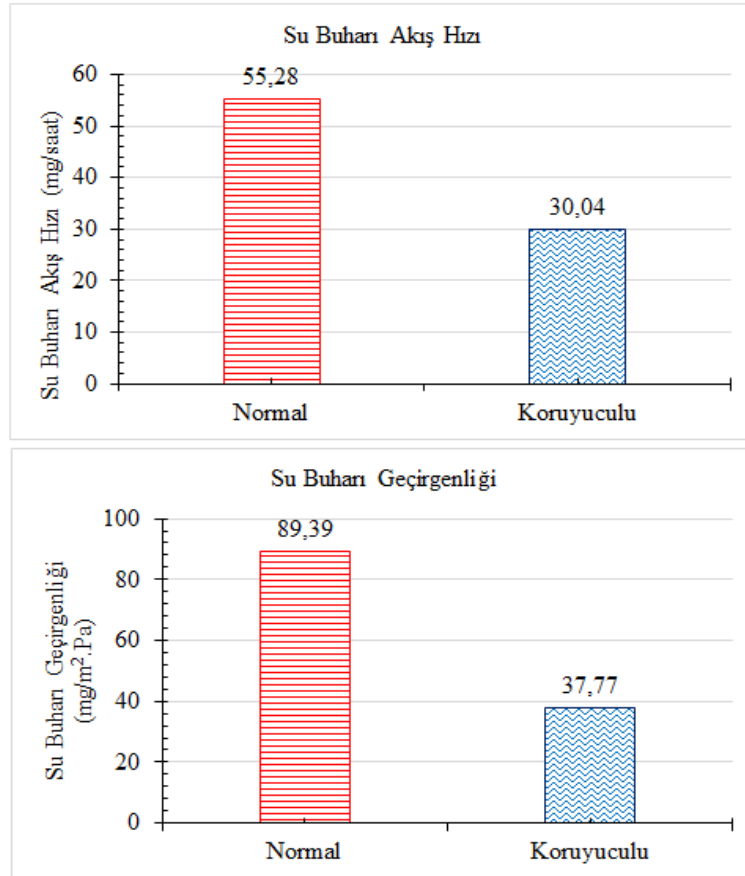
Şekil 5. Su buharı aktarım deneyinde tüf örneklerinin kütle ağırlık değişimleri grafiği



Şekil 6. Su buharı aktarım deneyinde tüf örneklerinin kütle ağırlık değişimleri % grafiği

Su buharı aktarım deneyinde, tüf örneklerinin su buharı akış hızı ve buhar geçirgenliği parametreleri grafikleri Şekil 7’de ve su buharı geçirgenlik hızı ve su buharı difüzyon direnci parametrelerinin grafikleri Şekil 8’de verilmiştir.

Normal tüflerde su buharı akış hızı ortalaması 55,28 mg/h iken kimyasal koruyucu sürülmüş tüflerde 30,04 mg/h olarak ölçülmüştür. Kimyasal koruyucu madde tüflerde su buharı akış hızı ortalamasını %84,01 oranında azaltmıştır. Su buharı geçirgenliği normal ve kimyasal koruyuculu tüflerde sırasıyla 89,39 mg/m<sup>2</sup>.Pa ve 37,77 mg/m<sup>2</sup>.Pa (%136,48 azalma) olarak hesaplanmıştır.

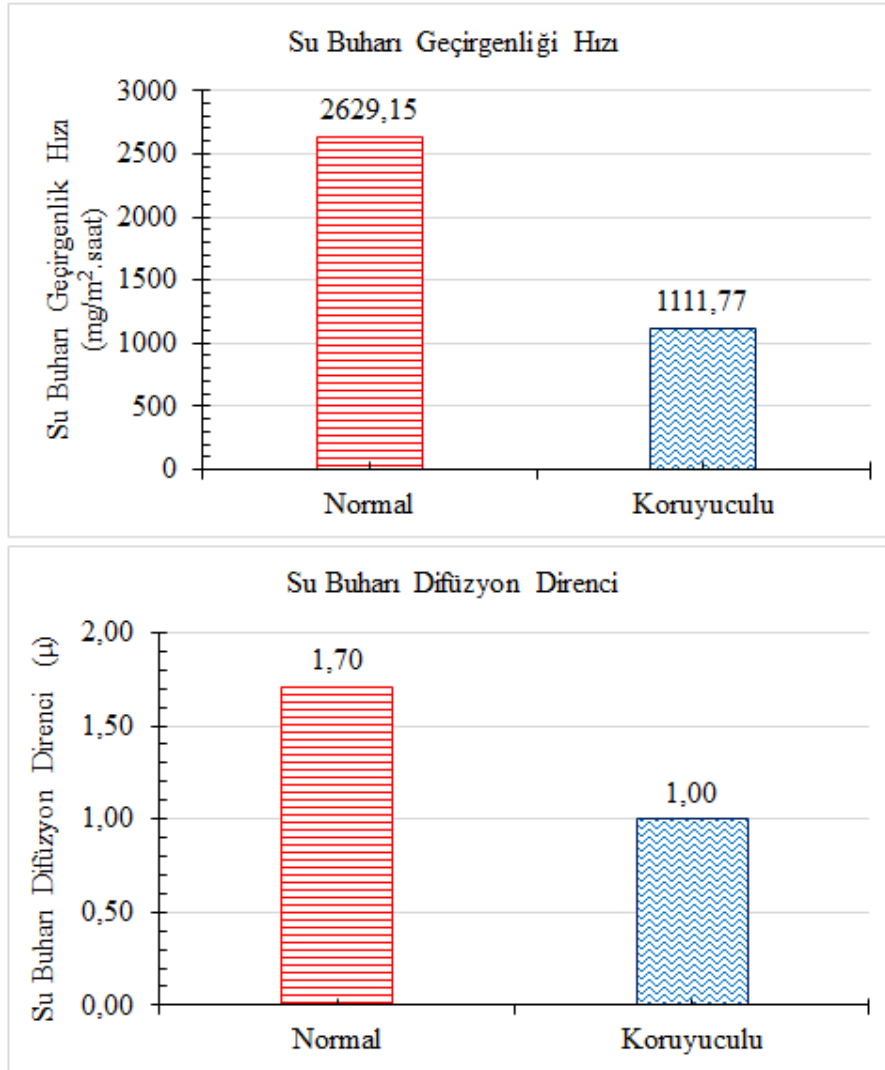


Şekil 7. Su buharı aktarım deneyinde tüf örneklerinin su buharı akış hızı ve buhar geçirgenliği parametreleri grafikleri

Normal tüflerde su buharı geçirgenlik hızı ortalaması 2629,15 mg/m<sup>2</sup>h iken kimyasal koruyucu sürülmüş tüflerde 1111,77 mg/m<sup>2</sup>h olarak tespit edilmiştir. Kimyasal koruyucu madde, tüflerde su buharı geçirgenlik hızı ortalamasını %136,48 oranında azaltmıştır.

Aynı örneklerde su buharı difüzyon direnci faktörü ( $\mu$ ) ise sırasıyla 1,7 ve 1 (%70,9 azalma) olarak belirlenmiştir. Silan esaslı koruyucu kimyasal madde tüfün su buharı aktarım verilerinde azalmalar sağlamıştır. Su buharı difüzyonu istenilen durumlarda koruyucu su itici kimyasal maddelerin sınırlı düzeyde kullanılması gerekmektedir.

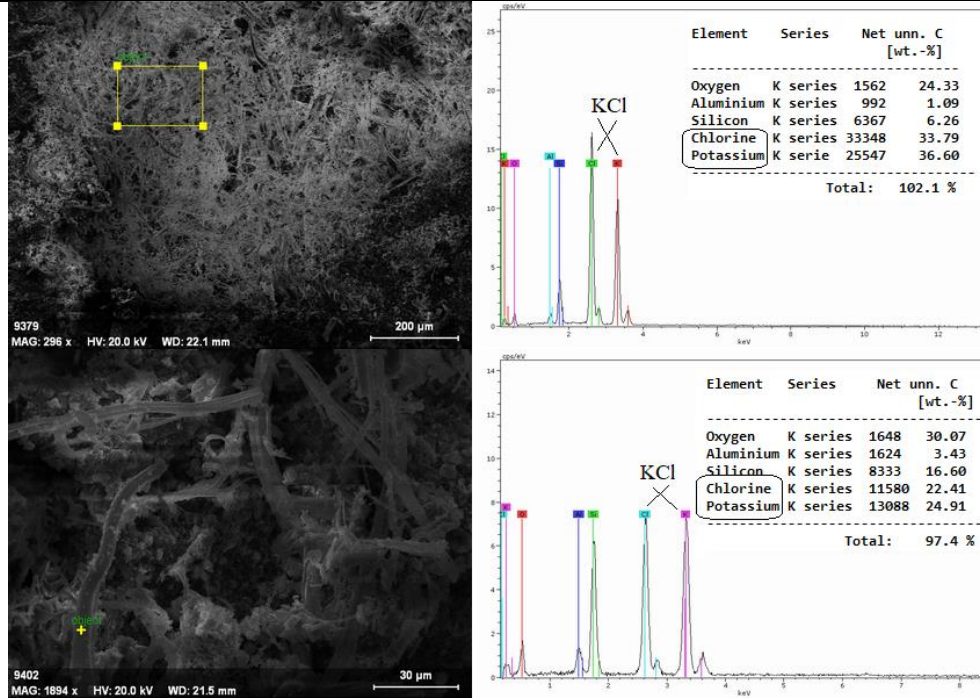




Şekil 8. Su buharı aktarım deneyinde tüf örneklerinin su buharı geçirgenliği hızı ve su buharı difüzyon direnci parametreleri grafikleri

### 3.5. Su Buharı Geçirgenliği Deneyi Sonrası Tüflerin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile İncelenmesi

Su buharı geçirgenliği deneyinde kullanılan Döğer tüfü yüzeylerinde ve gözeneklerinde oluşan tuz (potasyum klorür-KCl) varlığını incelemek amacıyla Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Tuz minerali olduğu belirlenen alanlarda elementel EDX analizi yapılmıştır. Döğer tüfü yüzeyinde ve gözeneklerde belirlenen potasyum klorür (KCl) kristalleri ve elde edilen SEM-EDX grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Potasyum klorür-KCl-Silvin kristallerinin genellikle taneler arası boşluklarda ve yüzeylerde biriktiği gözlenmiştir. Silvin kristalleri uzamış uzun kristaller halinde tespit edilmiştir. Silvin kristalleri bir araya gelerek gelişigüzel yumaklar oluşturmuştur. Bu kristallerin silvin olduğu EDX analizinde belirlenen potasyum ve klor elementleri varlığıyla teyit edilmiştir.



Şekil 9. Su buharı geçirgenliği deneyinde tüf yüzeyinde biriken tuz (KCl) minerallerinin görünümü ve EDX analizi ile belirlenen K ve Cl elementleri

#### 4. Sonuçlar

Gözenekli yapı taşlarının bağıl nem ve yağmur suyu gibi hava koşullarının bir fonksiyonu olarak suyu emdiği ve sıcaklık artışı ile de buharlaştırdığı bilinmektedir. Ayrıca, taş içindeki su hareketleri, malzemenin davranışını etkiler ve bozulmasına neden olabilir. Yapılarda kullanılan doğal taşlarda bünyesindeki suya bağlı olarak kışın ortaya çıkan terleme veya yoğuşma olayı da ayrışma açısından önem taşımaktadır. Yapı taşları yüzeyinde sıcaklık farklılığından dolayı yoğuşmayan su buharı, doğrudan malzeme içerisine girmektedir. Yapı taşları içerisine giren suyun yanı sıra su buharının da yoğuşmasıyla malzeme içindeki su miktarı artmaktadır. Bu nedenle yapı malzemesi olarak kullanılan tüflerin su buharı geçirgenliği özelliklerinin ortaya konulması amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma için Afyonkarahisar Döğer yöresinde bol miktarda bulunan, çıkarılan ve yapı taşı olarak kullanılan sarımsı-bej renkli bol gözenekli bir tüf tipi seçilmiştir.

Döğer tüfü örneklerinin su buharı aktarım deneyinde kütle ağırlık kaybı normal tüflerde %0,59, koruyuculu tüflerde ise %0,25 olarak belirlenmiştir. Yapılarda nefes alma olarak tabir edilen su buharı akış yoğunluğu değerinin büyük olması istenmektedir. Normal tüflerde su buharı geçirgenlik hızı ortalaması 2629,15 mg/m<sup>2</sup>h, kimyasal koruyucu sürülmüş tüflerde ise 1111,77 mg/m<sup>2</sup>h olarak ölçülmüştür. Kimyasal koruyucu madde, tüflerde su buharı geçirgenlik hız ortalamasını %136,48 oranında azaltmıştır. Su buharı difüzyonu istenilen durumlarda koruyucu kimyasal maddelerin sınırlı düzeyde kullanılması önerilmektedir.

#### Kaynaklar

- [1] E. Doehne, C.A. Price, Stone conservation: An overview of current research, 2nd ed., J. Paul Getty Trust, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, California. (2010).

- [2] D. Erkanol, A. Aydınoğ, Türkiye geneli doğal taş potansiyel alanlarının belirlenmesi projesi, MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 16 (2013) 147-156.
- [3] A. Özdemir, Bazı yapı malzemelerin kılcal su emme potansiyelleri, Selçuk Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Konya, 26 (1) (2002) 19-32.
- [4] M. Akın, Eskipazar (Karabük) travertenlerinin bozunmasının araştırılması. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 263 s. (Yayımlanmamış). (2008).
- [5] C.E. Ekinci, N. İşçi, F. Alyavuz, Yapılar nasıl hastalanır? e-Journal of New World Sciences Academy Natural and Applied Sciences, 2(1) (2007) 9-21.
- [6] L. Gündüz, N. şapçı, M. Karcı, Mermerlerin su buharı difüzyon karakteristikleri ve nefes alabilirlik. Mersem'2012 8. Uluslararası Mermer ve Dođaltař Kongresi, (2012). 739-749, Afyonkarahisar.
- [7] D. Honsinger, H.R. Sasse, Alteration of microstructure and moisture characteristics of stone materials due to impregnation', in Durability of Building Materials and Components – Proceedings of the Fifth International Conference, Brighton, 7-9 November, 1990, ed. J.M. Baker, P.J. Nixon, A.J. Majumdar and H. Davies, E. & F.N. Spon, London 213-224. (1991).
- [8] G.W. Scherer, G.S. Wheeler, Silicate consolidants for stone, Key Engineering Materials 391 (2009) 1-25.
- [9] K. Beck, Al-Mukhtar, M. Rozenbaum, O. Rautureau, M. Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire valley-France. Building and Environment, Elsevier, 38 (2003) 1151-1162.
- [10] ř.U. Atmaca, S. Kargıcı, Konya'da kiş aylarında yapı malzemelerinde oluşan buhar geçişinin örnekle incelenmesi. Mühendis ve Makine Dergisi, 47 (2006) 553, 55-62.
- [11] P. Mukhopadhyaya, D. Batcheller, M.K. Kumaran, J.C. Lackey, D. Van Reenen, N. Normandin, Correlation between water vapour and air permeability of building materials: experimental observations. Journal of ASTM International (JAI), 8(3) (2011) 1-14.
- [12] S. Nakabayashi, K. Nagano, M. Nakamura, J. Togawa, A. Kurokawa Improvement of water vapor adsorption ability of natural mesoporous material by impregnating with chloride salts for development of a new desiccant filter. Adsorption, 17 (2011) 675–686.
- [13] K. Ertaş, Binalarda buhar difüzyonu olayının irdelenmesi. TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Yalıtım Kongresi, (2001). 7-19, Eskiřehir-Türkiye.
- [14] S. Yu, X. Zhang, Hygrothermal characterization of porous building materials-new research method on water vapor transmission. Advanced Materials Research, (2012) 418-420, 903-907.
- [15] E. Vejmelková, M. Keppert, P. Reiterman, R. řerný, Mechanical, hygric and thermal properties of building stones. Proc. of the 13th Int. Conf. on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture STREMAH 2013, (2013). ed. C.A. Brebbia, WIT Press: Southampton, pp. 357-367.

- [16] M. D’Orazio, P. Munafò, A methodology for the evaluation of hygrometric and mechanical properties of consolidated stones. *International Journal of Architectural Heritage*, 10:5 (2016) 517-525.
- [17] Z. Pavlík, J. Žumár, I. Medved, R. Černý, Water vapor adsorption in porous building materials: experimental measurement and theoretical analysis. *Transp Porous Med.* 91 (2012) 939–954.
- [18] T. Togkalidou, M. Karoglou, A. Bakolas, A. Giakoumaki. A. Moropoulou, Correlation of water vapor permeability with microstructure characteristics of building materials using robust chemometrics. *Transp Porous Med.* 99 (2013) 273–295.
- [19] M. Keppert, J. Žumár, M. Čáchová, et al. Water vapor diffusion and adsorption of sandstones: influence of rock texture and composition, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2016) Article ID 8039748, 7 pages.
- [20] O. López, I. Torres, A.S. Guimarães, J.M.P.Q. Delgado, V.P. de Freitas Inter-laboratory variability results of porous building materials hygrothermal properties. *Construction and Building Materials.* 156 (2017) 412–423.
- [21] TS EN 1936. Doğal taşlar-deney yöntemleri-gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini, TSE, Ankara. 2010.
- [22] TS EN 13755. Doğal taşlar-deney yöntemleri-atmosfer basıncında su emme tayini, TSE, Ankara. 2014.
- [23] TS EN 14579. Doğal taşlar-deney yöntemleri-ses hızı ilerlemesinin tayini, TSE, Ankara. 2006.
- [24] TS EN 1926. Doğal taşlar-deney yöntemleri-tek eksenli basınç dayanımı tayini, TSE, Ankara. 2013.
- [25] TS EN ISO 12572. Binalarda kullanılan malzemelerin ve ürünlerin higrotermal performansı-Su buharı aktarımı özelliklerinin belirlenmesi, TSE, Ankara. 2001.
- [26] Schuh, H. *Physikalische eigenschaften von sandsteinen und ihren verwitterten oberflächen.* Münchner geowiss abh (b), Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munich. (1987).
- [27] Siegesmund S, Snethlage R, Editors. *Stone in architecture: properties, durability.* Fourth Edition, Berlin Heidelberg: Springer. (2011).
- [28] Heperkan, H.A. Bircan, M.M. Sevindir, M.K. Yapı malzemelerinde buhar difüzyonu ve yoğunlaşma, 5. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, (2001). İzmir, 461-470.
- [29] Snethlage, R. Wendler, E. *Methoden der steinkonservierung – anforderungen und bewertungskriterien’, denkmalpflege und naturwissenschaft, natursteinkonservierung I*, ed. R. Snethlage, Verlag Ernst & Sohn GmbH, Berlin, 3-40. (1995).
- [30] Sasse, H.R. Snethlage, R. *Methods for the evaluation of stone conservation treatments*, in *Report of the Dahlem Workshop, Saving our Architectural Heritage – The Conservation of Historic Stone Structures*, Berlin, 3-8 March 1996, ed. N.S. Baer and R. Snethlage, John Wiley and Sons, Chichester 223-243. (1997).

- [31] Snethlage, R. Leitfaden steinkonservierung – planung von untersuchungen und maßnahmen zur erhaltung von denkmälern aus naturstein, 3rd ed., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart. (2008).