



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 10.08.2024
Kabul Tarihi : 03.10.2024

Received Date : 10.08.2024
Accepted Date : 03.10.2024

İGNİMBİRİTLERE AİT FARKLI TANE BÜYÜKLÜĞÜNE SAHİP TAŞ TOZU VE EPOKSİ REÇİNE ESASLI KOMPOZİTLERİN TUZ ETKİSİNE BAĞLI HASARLARA KARŞI KORUMA POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE PROTECTION POTENTIAL OF STONE POWDER WITH DIFFERENT GRAIN SIZES BELONGING TO İGNİMBRİTES AND EPOXY RESIN BASED OF COMPOSİTES AGAINST DAMAGE DUE TO SALT EFFECT

Ahmet Cihat ARI¹ (ORCID: 0000-0002-4690-8968)

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Yozgat, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmet Cihat ARI, a.cihat.ari@bozok.edu.tr

ÖZET

Yapıların inşasında kullanılan taşlar nem oranı, tuz kristalleşmesi, iklimsel etkiler, hava kirliliği ve biyolojik faktörler gibi nedenlerden dolayı bozulmaya uğramaktadır. Tuz kristalleşmesi taşların bozulmasında en etkili faktörlerden birisidir. Taşlarda tuz kristalleşmesi yoluyla; çürümeler, çatlaklar ve aşınmalar gibi tahribatlara yol açmaktadır. Bu çalışmada, ignimbirit taş tozu (İTT) ve epoksi reçine (ER) esaslı kompozitlerin, yapı taşlarında tuz kristalleşmesi hasarlarına karşı onarımında kullanılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, Nevşehir ili ve çevresinden çıkarılan, yapıların inşaatında kullanılan ignimbiritlere ait farklı tane büyüklüğüne (63 µm, 150 µm, 250 µm, 500 µm, 1000 µm) sahip taş tozu ve matriks olarak epoksi reçine ile kompozitler hazırlanmıştır. Kompozitlerin tuz etkisine bağlı hasarlara karşı koruma potansiyelinin incelenmesi için; su emme, görünür yoğunluk, açık gözeneklilik ve tuz kristalleşmesi deneyleri yapılmıştır. Deney sonucuna göre, % 70 oranında <63 µm büyüklüğüne sahip İTT örneğinin, diğer örneklerle göre tuz etkisine karşı daha dirençli olduğu belirlenmiştir. Bu kompozit, yapı taşlarının tuz etkisine karşı korunmasında etkili olduğundan, yapıların tuz kristalizasyonu ile oluşan çürümüş kısımlarının onarımı için harç enjeksiyon uygulamasıyla kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Epoksi matriksli kompozitler, tuz direnci, güçlendirme, onarım, ignimbirit taşı

ABSTRACT

The stones used in the construction of buildings are subject to deterioration due to reasons such as humidity, salt crystallization, climatic effects, air pollution and biological factors. Salt crystallization is one of the most effective factors in the deterioration of stones. It causes damages such as decay, cracks and abrasions in stones through salt crystallization. This study aims to use ignimbrite stone powder (ISP) and epoxy resin (ER) based composites in the repair of salt crystallization damages in building stones. For this purpose, composites were prepared with stone powder of different grain sizes (63 µm, 150 µm, 250 µm, 500 µm, 1000 µm) belonging to ignimbrites extracted from Nevşehir province and its surroundings and used in the construction of structures, and epoxy resin as matrix. To investigate the protection potential of the composites against salt-induced damage; water absorption, apparent density, open porosity and salt crystallization experiments were carried out. According to the experiment results, it was determined that the ISP sample with a size of <63 µm at 70 wt.% was more resistant to salt effects than other samples. Since this composite is effective in protecting building stones against salt effects, it has been concluded that it can be used with mortar injection application for the repair of decayed parts of structures caused by salt crystallization.

Keywords: Epoxy matrix composites, salt resistance, reinforcement, repair, ignimbrite stone

ToCite: ARI, A. C., (2025). İGNİMBİRİTLERE AİT FARKLI TANE BÜYÜKLÜĞÜNE SAHİP TAŞ TOZU VE EPOKSİ REÇİNE ESASLI KOMPOZİTLERİN TUZ ETKİSİNE BAĞLI HASARLARA KARŞI KORUMA POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 169-178.

GİRİŞ

Tuz kristalleşmesi yapı malzemelerinin bozulmasına neden olan temel faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Moropoulou vd., 2003). Özellikle gözenekli taşlarda tuz kristalleşmesi; çiçeklenme, kabuklanma ve yüzey aşınmaları gibi çürüme biçimlerine neden olmaktadır. Taşın gözeneklerinin içine giren tuz kristallerinin büyümesi ve hızlı buharlaşma koşulları taşta iç kuvvetleri oluşturmaktadır. Bu durum taşlarda hasarların boyutunu arttırmakta ve yapıların dayanıklılığına ciddi şekilde zarar vermektedir (da Fonseca vd., 2023). Malzemedeki bu hasarların oluşmasında özellikle gözenek oranı ve geometrisi etkili olmaktadır. Gözeneklilik malzemenin sıvı hareketlerini düzenlediği için, tuz kristalleşme sürecinde bozulmanın oluşmasında başlıca parametrelerden biridir. Ayrıca su emme oranı, yoğunluk ve ağırlık miktarındaki değişim gibi faktörler taşıdaki bozulmanın bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla taşlarda tuz etkisine bağlı hasarların azaltılmasını, önlenmesini ve yapıların dayanıklılığını sağlamak için bu bozulma faktörlerinin incelenmesi önemlidir (Ruffolo vd., 2017). Literatürde taşların tuz etkisine bağlı bozulma faktörleri üzerinde birkaç çalışma yürütülmüştür. Örneğin Benavente vd. (1999) yaptıkları çalışmada, yüksek gözenek içeren taşların tuzlu su emme oranı, kristalleşme olasılığını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Lubelli vd. (2007) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, taşlarda sodyum klorür tuzunun hidrofilik yüzeylere göre hidrofobik yüzeylerde daha çok kristalleştirdiğini göstermişlerdir.

Yapılardaki hasarların onarımı ve korunmasında polimer matriksli kompozitlerin kullanımı günümüzde giderek hız kazanmaktadır. Polimer matriksli kompozitler, harç enjeksiyon uygulamasıyla hasar gören malzemenin iç kısımlarına enjekte edilerek, çürüme kaynaklı oluşan boşluklar doldurulmaktadır. Bu uygulama yöntemi, yapıya zarar vermeden yapının hasar gören kısımlarının ve taşıma gücünün iyileştirilmesini sağlamaktadır (D'Arienzo vd., 2008). Tuz kristalleşmesine bağlı hasarların azaltılması için kullanılacak kompozitlerde, polimer matriks ile dolgu maddesi arasındaki arayüz etkileşimi önemli yere sahiptir. Bu etkileşim sonucunda bazı bileşiklerde, malzemenin iç basıncı artarak genleşme sorunları görülmektedir. Bu durum tuz kristallerinden daha fazla hasarlara neden olabilmektedir (Granneman vd., 2019). Bu nedenle polimer matriksli kompozitlerin, tuz etkisine bağlı bozulma süreçleri incelendikten sonra yapıların onarımında kullanılması gerekmektedir. Taşları hasarlara karşı korumak için kullanılan polimer malzemelere; epoksi reçine, akrilik reçine, etil silikat, polietilen glikol örnek olarak verilebilir (Chen vd., 2023). Literatürde, taşların tuz kristalleşmesi hasarlarında kullanılabilecek polimer matriksli kompozit malzemelere yönelik çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Örneğin Andreotti vd. (2019) yaptıkları çalışmada, poliakrilik esaslı kompozitlerin, taşların gözenek oranını iyileştirerek, tuz emiliminin azaldığını ve tuz kristalleşmesi hasarlarına karşı daha dirençli olduğunu belirlemişlerdir. Jia vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, kumtaşı ve silikat esaslı kompozitler, taşların gözenek yüzeylerini doldurarak tuz etkisine bağlı hasarlara karşı önleyici performans gösterdiği tespit edilmiştir. Luan vd. (2008) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, epoksi reçine ve silikat esaslı kompozitler, taşların gözenek ve su emme oranının azalmasını sağlayarak, tuz kristalleşmesi hasarları üzerinde belirgin bir koruyucu etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Görüldüğü gibi polimer matriksli kompozitlerde, matriks ve dolgu arasındaki kimyasal tepkime sonucunda oluşan bağ kuvveti, taşların gözenek ve su emme oranlarını azaltarak, tuz kristalizasyon hasarlarına karşı direncini arttırmaktadır. Ancak taşların ve polimer malzemelerin farklı özelliklere sahip olması, farklı yapısal davranış göstermesine neden olmaktadır. Ayrıca matriks ve dolgu malzemelerinin bileşimi sırasında oluşan etkileşim türüne göre, kompozitlerin tuz etkisine bağlı hasarlara karşı koruma potansiyelleri değişmektedir.

Nevşehir ili; peri bacaları, ören yerleri, eşsiz doğal güzellikleri, yeraltı şehirleri ve çeşitli dönem uygarlıklarına ait mimari eserleriyle tarihi ve kültürel miras açısından önemli bir yere sahiptir. Nevşehir ilindeki tarihi yapılarda ve piroklastik kayaç özelliğine sahip ignimbirit taşı kullanılmıştır (Kaşmer vd., 2013). Ayrıca bu taş günümüzde yapılarda süsleyici görünümleri nedeniyle dış cephe kaplamasında, yapı elemanlarında ve restorasyon uygulamalarında kullanılmaktadır (Korkanç, 2007). Ancak ignimbirit taşının yüksek gözenekliliği nedeniyle kılcal su emme potansiyelini arttırmaktadır. Bölgede inşa edilen birçok tarihi ve doğal miras yapısının bozulmasında ve ayrışmasında ignimbirit taşının su emme potansiyeli önemli rol oynamaktadır (Dinçer ve Bostancı, 2019). Bu durum, ignimbirit taşının aşınma mekanizmalarıyla ilgili çalışmaların yapılmasına neden olmuştur. Literatürde ignimbirit taşının ayrışması üzerinde; tuz kristalleşmesinin etkisi (Özşen vd., 2017), nem nedeniyle oluşan dayanıklılığın azalması (Topal ve Doyuran, 1997), kılcal su emme özelliklerinin bozulmasındaki rolü (Dinçer ve Bostancı, 2019), liken büyümesinden dolayı oluşan hasarlar (Garcia-Vallès vd., 2003) ve rüzgar erozyonuna bağlı oluşan bozulmalar (Aydar ve Akkaş, 2022) incelenmiştir. Ancak, epoksi matriksli kompozitlerin ignimbirit taşların tuz etkisine bağlı bozulma süreçleriyle oluşan hasarları önleme yetenekleri üzerine literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu nedenle, kompozitlerin tuz etkisine bağlı bozulma süreçlerine yönelik davranışının belirlenmesi ve yapıların bakım, onarım ve koruma projeleri için oldukça önemlidir.

Bu çalışma kapsamında yapı taşlarında tuz kristalleşmesi hasarlarının onarımında kullanılmak amacıyla Nevşehir ili ve çevresinden çıkarılan, yapıların inşaatında kullanılan ignimbirit taş tozu (İTT) ve epoksi reçine (ER) ile kompozitler üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde; ignimbiritlere ait farklı tane büyüklüğüne (63 µm, 150 µm, 250 µm, 500 µm, 1000 µm) sahip taş tozu ve matriks olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Elde edilen kompozitlerin; su emme, görünür yoğunluk, açık gözeneklilik ve tuz kristalleştirmesi deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerle, elde edilen kompozitlerin tuz etkisine karşı korunmasında etkili olup olmadığı belirlenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

İgnimbirit, volkanik hareketler sonucu yeryüzüne çıkan pomza ve volkanik kaya parçaları sonucu oluşan piroklastik kayaların yüksek sıcaklık etkisi altında birikmesi ve soğumasıyla oluşmaktadır (Moon, 1993; Walker, 1983). Nevşehir ilinde geniş alanlarda yüzeylenen Kavak ignimbiritleri bölgedeki yapıların inşaatlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Korkaç, 2007). Ürgüp Formasyonunun en alt bölümünde Kavak ignimbiritleri en eski piroklastik yatakları temsil etmektedir. Kavak ignimbiritinin kimyasal bileşimlerine göre dasit, trakiandezit ve riyolit bileşimine sahiptir (Tablo 1) (Çiflikli, 2020).

Tablo 1. Kavak İgnimbiritlerinin Kimyasal Bileşimi (Korkaç, 2007)

Oksit	Ağırlık (%)
SiO ₂	78,44
Al ₂ O ₃	13,9
Fe ₂ O ₃	0,78
MgO	0,02
CaO	0,05
Na ₂ O	0,03
K ₂ O	0,13
TiO ₂	0,23
P ₂ O ₅	0,04
MnO	<0,01
Cr ₂ O ₃	<0,001
A.K. (1000°C)	6,4
Toplam	100,05

Bu çalışmada kompozitlerin üretiminde dolgu olarak ignimbirit taş tozu (İTT) ve matriks olarak epoksi reçine (ER) kullanılmıştır. İTT Nevşehir ilinde taş üretimi yapan firmadan temin edilmiştir. Kompozitlerde matriks olarak kullanılan ER'de A ve B olarak iki bileşen bulunmaktadır. ER'nin A bileşeni bisfenol-A tipi kimyasal bileşiği içerirken, ER'nin B bileşeni ise cycloalifatik poliamin sertleştirici maddesini içermektedir. Deneylerde kullanılan malzemelerin bazı özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

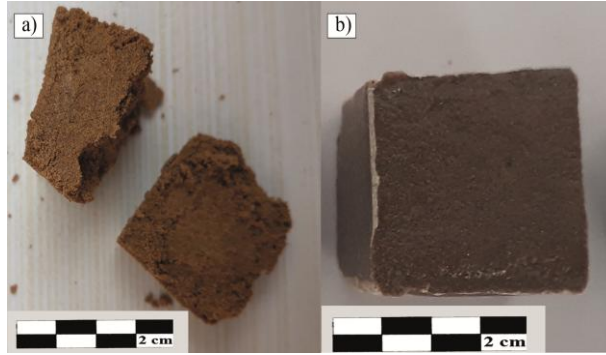
Tablo 2. Çalışma Kapsamında Kullanılan Malzemelerin Bazı Özellikleri (Url1; Url2)

Kullanılan Malzemeler	Fiziksel Özellikleri
İgnimbirit Taş Tozu (İTT)	Renk: Sarı
	Yoğunluk (g.cm ⁻³ , 20°C'de): 1,50–1,58
	Su emme (% , 23°C'de): 24,83
Epoksi Reçine (ER)	Renk ve Görünüm: Şeffaf ve Parlak
	Yoğunluk (g.cm ⁻³ , 20°C'de): 1,10
	Karışım Oranı (A/B): 5/3
	Viskozite (cps, 20°C'de): 520–550
	Karışım Ömrü (25°C): 30 dakika
	Kuruma Süresi (25°C): 12 saat
Mekanik Mukavemet: 7 gün	

Kompozit Örneklerin Hazırlanması

İgnimbirit taşlarının çıkarılması sırasında ve yapıların inşaatlarında kullanılmasında taş kesim atıkları oluşmaktadır. Taşların uygun boyutlara getirilmesinde ve işleme sırasında ortaya çıkan kesim atıkları Retsch AS 200 elek cihazıyla farklı boyutlarda (63 µm, 150 µm, 250 µm, 500 µm ve 1000 µm) elek set aparatları kullanılarak elenmiştir. Her bir elek set aparatlarına 100 g taş kesim atıkları yerleştirilerek 10 dakika boyunca sarsma işlemi uygulanmıştır. Eleme işlemin sonunda istenilen boyutlarda ignimbirit taş tozu (İTT) elde edilmiştir.

İgnimbirit taşının kesim atığı olan İTT, reçine üretimine göre maliyetsiz olarak kabul edilir. Ayrıca taş atıklarının birikimini azaltmak, çevre kirliliğini önlemek ve ekonomiye kazandırmak bu atıkların inşaat sektöründe yeniden kullanımı açısından daha fazla avantajlara sahiptir. Bu nedenle bu çalışmada, kompozitlerin hazırlanmasında taş tozlarının mümkün olduğu kadar yüksek oranda kullanılması hedeflenmiştir. Bunun için en yüksek İTT oranına sahip kompozitlerin geliştirilmesi için ön çalışmalar yapılmıştır. Ön çalışmalarda % 30, % 50, % 70 ve % 80 İTT oranına sahip kompozitler hazırlanmıştır. Bu ön çalışmalar sonucunda örnek bütünlüğünü koruyan en yüksek İTT oranının ağırlıkça % 70 olduğu belirlenmiştir. Ancak kompozitlerin hazırlanmasında % 70 İTT oranı aşıldığında, matris miktarının örnek bütünlüğünü korumada yetersiz olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 1). Bu nedenle, deney çalışmaları için % 30 oranında epoksi matrisi ve % 70 oranında İTT'lerin olduğu kompozitler seçilmiştir.

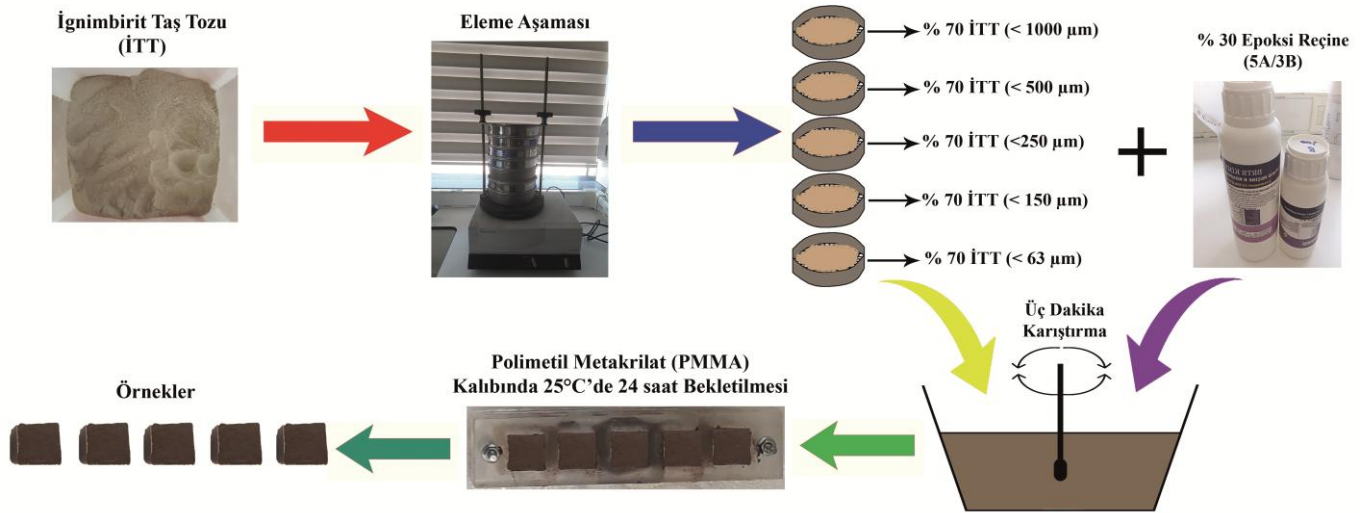


Şekil 1. a. % 70 İTT Oranının Üzerinde Hazırlanan Örneğin Parçalanması b. % 70 İTT Oranına Sahip Örneğin Yapı Bütünlüğünü Koruması

Kompozit örneklerinin hazırlanmasında el yatırma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem; herhangi bir ısı işlem gerektirmemesi, daha az miktarda ekipman kullanarak üretim maliyetinin azalması, uygulama koşullarında sertleşerek hızlı ve kolay şekilde üretimin yapılması gibi nedenlerden tercih edilmiştir. ER/İTT kompozit örneklerinin hazırlanması için % 30 oranında epoksi reçine ve % 70 oranında <63 µm büyüklüğüne sahip İTT'ler bir kaba koyulmuştur. Daha sonra bu karışım üç dakika boyunca elle karıştırılmıştır. ER'nin A ve B iki bileşenin karışım oranı, üretici firmanın tavsiye ettiği 5:3 oranına göre hazırlanmıştır. Bileşenleri 5:3 oranında karıştırmak için 5 birim A bileşeni, 3 birim B bileşeni ilave edilmiştir. Taş tozu ve epoksi reçine ilave edilmiş bu karışım üç dakika kadar tekrar karıştırılmış olup, 20x20x20 mm boyutlarında polimetil metakrilat (PMMA) kalıbına dökülmüştür. Kalıpta bu karışım 25°C'de 24 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda kompozit örneklerin sertleşmesi tamamlanmış olup, deneysel çalışmalarında gerçekleştirmek için kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan bu örnekler KÖ63 olarak isim verilmiştir. Benzer işlem süreçleri epoksi matrisine, <150 µm, <250 µm, <500 µm ve <1000 µm tane büyüklüklerine sahip ignimbirit taş tozlarının ilavesi ile tekrarlanmış olup, sırasıyla KÖ150, KÖ250, KÖ500 ve KÖ1000 olarak isimlendirilen diğer kompozit örnekler hazırlanmıştır. Tüm kompozit türlerinin her birinden 5'er adet küp örnekler hazırlanarak deney çalışmalarının ölçümüne hazır hale getirilmiştir. Deney çalışmaları kapsamında üretilen kompozit örneklerin kısaltmaları ve içerikleri Tablo 3'de verilmiştir. Kompozit örneklerin hazırlama aşamaları Şekil 2'de kısaca özetlenmiştir.

Tablo 3. Deney Çalışmaları Kapsamında Üretilen Kompozit Örneklerin Kısaltmaları Ve İçerikleri

Kompozit Örneklerin (KÖ) Kısaltmaları	ER/İTT Oranı (%)	İTT Boyutları (µm)
KÖ63	30/70	<63
KÖ150	30/70	<150
KÖ250	30/70	<250
KÖ500	30/70	<500
KÖ1000	30/70	<1000



Şekil 2. Kompozit Örnekleri Hazırlama Aşamaları

Yöntem

Tuz Kristalizasyonu Deneyi

Kompozitlerin tuz kristalleşme deneyi TS EN 12370 (2001) standardına göre, % 14'lük çözeltiler hazırlanarak yapılmıştır. Bu çözeltiler içerisine kompozit örnekler 20°C 'de 2 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda kompozit örnekler 16 saat etüv fırında 105°C 'de kurutulduktan sonra 2 saat oda sıcaklığında soğuması için bekletilmiştir. Bu işlemler 10 kez tekrar edilmiş olup, 10. işlemin sonunda, örneğinin ağırlığı ile deney öncesi örneğinin kuru ağırlığı arasındaki fark not edilmiştir.

Su Emme Deneyi

Kompozit örneklerin su emme deneyi ASTM D570-98 (2005) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi kompozit örneklerin kuru ağırlıkları 0,001 g hassasiyetli hassas terazide ölçülmüştür. Daha sonra saf su dolu kaplarda bu örnekler 20°C 'de 24 saat bekletilmiştir. Bu işlem sonrasında su emmiş örneklerin 0,001 g hassasiyetli hassas terazide ağırlıkları kaydedilmiştir. Son olarak örneklerin su emmiş ağırlığı ile kuru ağırlığı arasındaki fark kaydedilerek kompozit örneklerin su emme oranlarındaki değişim tespit edilmiştir.

Görünür Yoğunluk

Kompozit örneklerin görünür yoğunluk değerlerinin belirlenmesinde TS EN 1936 (2010) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Görünür yoğunluk değerlerinin belirlenmesi için, su emmiş örneklerin öncelikle 100°C etüv fırında sabit kütleye gelinceye kadar kurutma işlemi yapılmıştır. Bu örnekleri nem ve rutubetten korumak için desikatörün içinde oda sıcaklığında 2 saat soğuması için bekletilmiştir. Bu işlemden sonra desikatörün içerisinden örnekler çıkarılarak 0,001 g hassasiyetli hassas terazide ağırlıkları not edilmiştir. Daha sonra su emmiş örneklerin ağırlıkları ve su içerisinde örneklerin ağırlıkları arasındaki fark kaydedilmiştir.

Açık Gözeneklilik

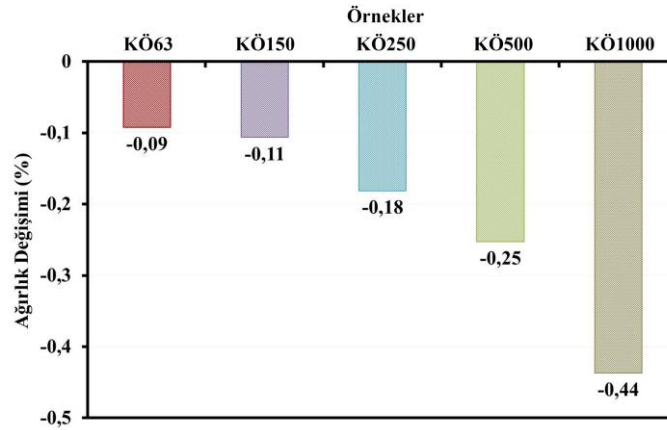
Kompozit örneklerin açık gözeneklilik değerlerinin belirlenmesi için, su emmiş örneklerin öncelikle 100°C etüv fırında sabit kütleye gelinceye kadar kurutma işlemi yapılmıştır. Yeterince kuruyan örnekler, desikatörün içine koyulmuş ve oda sıcaklığında 2 saat soğuması için bekletilmiştir. Bu süre sonrasında desikatörün içerisinden örnekler çıkarılarak 0,001 g hassasiyetli hassas terazide ağırlıkları tartılmıştır. Son olarak su emmiş örneklerin ağırlıkları ve su içerisinde örneklerin ağırlıkları arasındaki fark not edilerek, TS EN 1936 (2010) standardına göre hesaplanmıştır.

ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tuz Kristalizasyonu Deneyinin Sonuçları

Kompozit örneklerin tuz kristalizasyon deneyinde ölçülen kuru ağırlık değişimi Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'de verilen sonuca göre, kompozit örneklerin ağırlık değişiminde % 0,09 ile % 0,44 kadar azalış göstermiştir. Tuz kristalizasyon deneyinden sonra ağırlık değişimlerinin % 1 oranından daha düşük olması, kompozit örneklerin yapısal bütünlüğünün korunduğunu ifade etmektedir. Epoksi matriksine $<63 \mu\text{m}$ büyüklüğüne sahip İTT

eklendiğinde elde edilen KÖ63 kompozitin tuz kristalizasyon deneyi sonunda % 0,09 oranında çok düşük bir ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Ancak tanecik boyutu her ne olursa olsun tüm kompozitlerin tuz kristalizasyon deneyinden sonra fiziksel görünümü ve renginde herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. İTT'lerin boyutu 63 µm üstüne çıkarıldığında elde edilen kompozitlerde, tuz kristalizasyon deneyi sonrasında ağırlık kaybında lineer bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, İTT'lerin boyutu 63 µm üstüne çıkarıldığında matriks ile etkileşime girebilen partiküllerin toplam yüzey alanının azalması, kompozitlerin tuz kristalizasyon direncinin azalmasına neden olduğunu göstermektedir.



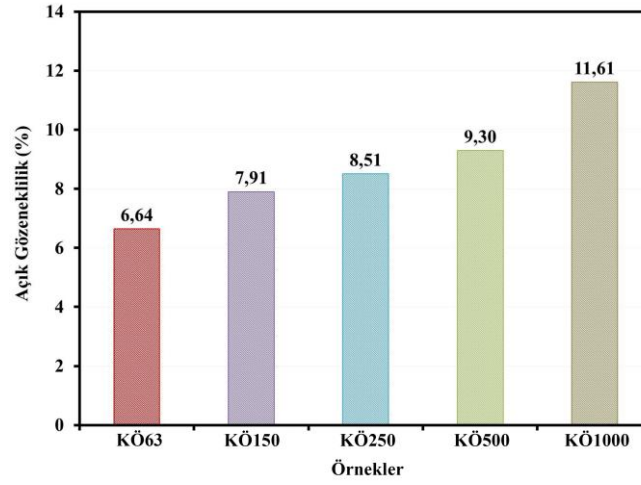
Şekil 3. Kompozit Örneklerin Tuz Kristalizasyonu Deneyinin Sonunda Kuru Ağırlık Değişimi

Literatürde taşların ve polimer kompozitlerin tuz kristalleşme hasarlarına yönelik bazı çalışmaların yapıldığı görülmektedir (Andreotti vd., 2019; Pinna vd., 2011; Topal ve Doyuran, 1998). Örneğin, Topal ve Doyuran (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ignimbirit taşının tuz kristalizasyon deneyi sonucunda % 1,62 ağırlık kaybı olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu araştırma kapsamında, kompozit örneklerin tuz kristalizasyon deneyi sonunda kuru ağırlık değişimleri, ignimbirit taşının tuz kristalizasyon deneyi sonunda kuru ağırlık değişiminden daha az olduğu görülmektedir. Bu sonuç, polimer matriksli kompozitlerin yıpranmış taşların tuz etkisine bağlı hasarlarının restorasyonu için harç enjeksiyon uygulamasıyla kullanılabilirliğini göstermektedir. Benzer sonuç, Pinna vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kireçtaşı ve mermerlerin tuz etkisine bağlı hasarların restorasyonu için polimer matriksli kompozitler önerilmiştir. Aynı çalışmada, polimer matriksli kompozitlerin tuz kristallerinin büyümesini engellediği belirlenmiştir. Ayrıca polimerler gözeneklere su girişini önleyerek, tuzun çözünmesini engellemekte, kompozitler taşların tuz direncinin iyileştirmesine katkı sağlamaktadır (Andreotti vd., 2019; Vacchiano vd., 2008). Ancak literatürde taş tozu ve epoksi matriks esaslı kompozitlerin tuz kristalleşmesi hasarlarına yönelik yeterince çalışma bulunmamaktadır. Bundan dolayı bu araştırma kapsamında ER/İTT kompozitleri için tuz kristalizasyon deneyi sonunda kuru ağırlık değişimlerinin ölçülmesi, literatüre önemli bir katkı sağlayacağı beklenmektedir.

Açık Gözeneklilik Değerlerinin Sonuçları

Taşların gözenek yüzeylerinden emilen tuzun, buharlaşma sırasında kristalleşmesiyle basınç oluşmaktadır (Scherer, 1999). Bu durum sonucunda yeni çatlakların oluşması ve gözeneklerin genişlemesiyle; taşlarda parçalanma, ayrılma ve kırılma gibi hasarlara neden olabilmektedir (Scherer vd., 2001). Bu nedenle taşların onarımında kullanılacak kompozitlerin tuz etkisine karşı direncini araştırmak için kullanılan parametrelerden biri malzemenin gözenek oranıdır (Benavente vd., 2004). Kompozit örneklerin açık gözeneklilik değerlerinin sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. Şekil 4'de verilen sonuca göre, kompozit örneklerin açık gözeneklilik değerleri % 6,64 ile % 11,61 arasında değişmektedir. Epoksi matriksine <63 µm büyüklüğüne sahip İTT eklendiğinde elde edilen KÖ63 kompozitin % 6,64 ile en düşük açık gözenek oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Kompozitlerdeki İTT tanecik boyutunun büyüklüğünün artmasına bağlı olarak açık gözenek oranı da artmaktadır. Kompozitlerde daha fazla açık gözeneklilik oranının olması, tuz kristallerine karşı dayanıklılığının azalmasına neden olmaktadır (Şekil 3). Korkanç ve Solak (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Kavak ignimbirit taşının gözenek oranının % 16,54 olduğu tespit edilmiştir. Bu araştırma kapsamında elde edilen ER/İTT kompozitlerin, ignimbirit taşlarından daha az gözeneklere sahiptir. Epoksi reçinesinin taş tozlarının gözeneklerini doldurarak kompozitlerin ignimbirit taşlarından daha az gözeneklilik sergilemesini sağlamaktadır. Ayrıca literatürde Alves vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, taş tozlarına epoksi reçinesi eklenmesiyle elde edilen kompozitin, taşlardan daha az bir gözenek sergilediği

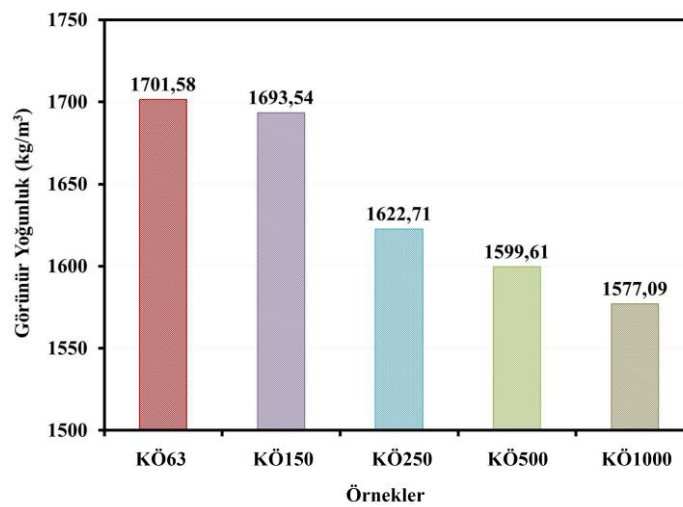
belirlenmiştir. Dolayısıyla bu araştırma kapsamında ölçülen açık gözeneklilik oranlarının literatürdeki ilgili çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Kompozit Örneklerin Açık Gözeneklilik (%) Değerlerindeki Değişim

Görünür Yoğunluk Değerlerinin Sonuçları

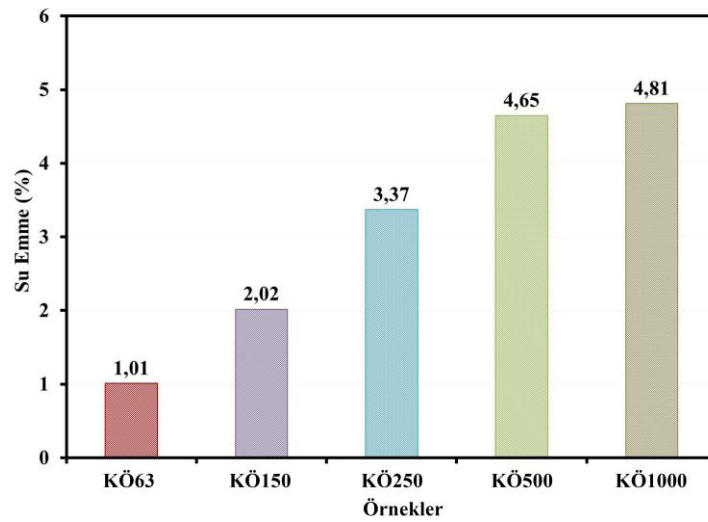
Kompozit örneklerin görünür yoğunluk değerlerinin sonuçları Şekil 5’de verilmiştir. Şekil 5’de verilen sonuca göre, kompozit örneklerin görünür yoğunluk değerleri $1577,09 \text{ kg/m}^3$ ile $1701,58 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. Kompozitler arasından en yüksek görünür yoğunluğu $1701,58 \text{ kg/m}^3$ değeri ile epoksi matrisine $<63 \mu\text{m}$ büyüklüğüne sahip İTT eklendiğinde elde edilen KÖ63 kompozitidir. Ancak İTT’lerin boyutu $63 \mu\text{m}$ üstüne çıkarıldığında elde edilen kompozitlerin görünür yoğunluk değerlerinin KÖ63 kompozitinin görünür yoğunluk değerlerine göre azaldığı tespit edilmiştir. Örneğin hazırlanan KÖ150, KÖ250, KÖ500 ve KÖ1000 kompozitlerinin görünür yoğunluk değerleri, KÖ63 örneğinin görünür yoğunluk değerine göre sırasıyla yaklaşık % 0,47, % 4,63, % 5,99 ve % 7,31 azalış göstermiştir. Kompozitlerin yoğunluğunun değişmesinde açık gözenek oranının birbirinden farklı olması etkili olmaktadır. Açık gözeneklilik oranının az olduğu kompozitin yüzeyinde tuz birikmesiyle kompozitte görünür yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır (Şekil 4 ve Şekil 5). Bu nedenle KÖ63 kompozitin % 6,64 oranında açık gözeneklilik değeri, diğer kompozitler arasından en düşük değerde olması bu kompozit $1701,58 \text{ kg/m}^3$ görünür yoğunluğuyla diğer kompozitler arasında en yüksek değere sahip olmasını sağlamıştır. Literatürde Moropoulou vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada, polimer kompozitler, taşların gözenek yüzeylerini azaltarak tuz kristallerini yüzey üzerinde biriktirerek malzemenin yoğunluğunu arttırdığı ifade edilmiştir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında ölçülen görünür yoğunluk değerlerinin literatürdeki ilgili çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Kompozit Örneklerin Görünür Yoğunluk (kg/m^3) Değerlerindeki Değişim

Su Emme Deneyinin Sonuçları

Yapı taşlarına, atmosferik ve nem etkileriyle suyun nüfuz etmesi tuz kristalleşmesi hasarlarına neden olmaktadır (Raneri vd., 2016). Bu nedenle, kompozitlerin tuz etkisine bağlı bozulma sürecini daha iyi anlamak için su emme deneyi yapılmıştır. Kompozit örneklerin su emme değerlerinin sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da verilen sonuca göre, kompozit örneklerin su emme değerleri % 1,01 ile % 4,81 arasında değişmektedir. Kompozitlerdeki İTT tanecik boyutunun büyüklüğünün artmasına bağlı olarak su emme oranı da artmaktadır. Bu sonuç, açık gözeneklilik değerlerinin sonuçlarıyla uyumlu olarak, epoksi matriks ile etkileşime girebilen taş tozlarının yüzey alanının azalması su girişini önleyen koruyucu ince bir tabaka oluşturmasıyla ilişkilendirilebilir. Literatürde ignimbirit taşının su emme değerleri % 17 ile % 28,08 arasında değişmektedir (Erguler, 2009; Topal ve Doyuran, 1998). Dolayısıyla bu araştırma kapsamında, kompozit örneklerin su emme değerlerinin, ignimbirit taşının su emme değerlerinden daha az olduğu görülmektedir. Bu sonuç, kompozitlerin yıpranmış taşların su emmeden kaynaklı hasarlar için kullanılabileceğini göstermektedir. Literatürde polimer kompozitlerin su emmeden kaynaklı hasarlarına yönelik bazı çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Örneğin Sahu vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, epoksi reçine ve taş tozu esaslı hibrit polimer esaslı kompozitlerin yaklaşık % 0,01 çok düşük bir su emilimi olduğunu göstermiştir. Arumugam vd. (2023) başka bir çalışmada ise, granit tozu ve epoksi matriks esaslı kompozitlerin suya karşı dirençli bir özellik sergilediğini belirlemiştir. Bu çalışmalarda, polimer malzemelerin suyun taşlara girişini önleyerek, çürüme sürecini yavaşlattığı belirtilmiştir. Bu nedenle ER/İTT kompozitlerin ölçülen su emme değerlerinin literatürdeki ilgili çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Kompozit Örneklerin Su Emme (%) Değerlerindeki Değişim

SONUÇLAR

Polimer matriksli kompozitlerde, harç enjeksiyonu uygulaması, yapılarda çürümüş ve hasarlı kısımların restorasyonunda kullanılan yaygın uygulama yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, yapıya zarar vermeden yapının hasar gören kısımlarını ve taşıma gücünü iyileştirmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak yapılardaki taşların ve polimer malzemelerin farklı özelliklere sahip olması, farklı yapısal davranış göstermesi nedeniyle, yapıların restorasyonundan önce polimer matriksli kompozitler hakkında yapılacak araştırmalar büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, farklı tane büyüklüğüne sahip ignimbirit taş tozu (63 µm, 150 µm, 250 µm, 500 µm, 1000 µm) ve epoksi reçine kullanılarak elde edilen kompozitlerin, yapı taşlarının tuz kristalleşmesi hasarlarının onarımında kullanılmasına odaklanılmıştır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında elde edilen kompozit malzemelerin, ignimbirit taşlarının tuz etkisine bağlı hasarlara karşı koruma potansiyelleri incelenmiştir. Kompozitlerdeki taş tozlarının tanecik büyüklüğünün artmasıyla, tuza karşı gösterdiği direnç azalmıştır. % 70 oranında <63 µm büyüklüğüne sahip İTT ile elde edilen KÖ63 kompozit örneğinin hem ignimbirit taşının hem de diğer kompozit örnekler göre tuz etkisine karşı daha dirençli olduğu belirlenmiştir. Bu kompozitin tuz kristalleşmesi (% 0,09), açık gözeneklilik (% 6,64), görünür yoğunluk (1701,58 kg/m³) ve su emme (% 1,01) deneylerindeki değerleri diğer kompozitlerin değerlerine göre teknik özellik açısından en iyi kompozit olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tüm kompozitlerde epoksi reçinesi taş tozlarının gözeneklerini doldurarak suyun gözeneklerden nüfuz etmesini engellemiştir. Bu da kompozitlerin ignimbirit taşına göre tuzun çözünmesini önlemekte ve tuz kristallerini yüzey üzerinde biriktirerek tuz etkisi nedeniyle oluşabilecek hasarlara karşı daha dirençli hale getirmiştir. Sonuç olarak KÖ63 kompozitinin, tuz

etkisine bağlı hasarlara karşı dayanıklı özellikleri sayesinde, yapıların çürümüş kısımlarının restorasyonunda harç enjeksiyon uygulaması için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Alves, R. A., Strecker, K., Pereira, R. B., & Panzera, T. H. (2020). Mixture design applied to the development of composites for steatite historical monuments restoration. *Journal of Cultural Heritage*, 45, 152-159.
- Andreotti, S., Franzoni, E., Ruiz-Agudo, E., Scherer, G. W., Fabbri, P., Sassoni, E., & Rodriguez-Navarro, C. (2019). New polymer-based treatments for the prevention of damage by salt crystallization in stone. *Materials and Structures*, 52, 17.
- Arumugam, H., Iqbal, M. M., Ahn, C.-H., Rimdusit, S., & Muthukaruppan, A. (2023). Development of high performance granite fine fly dust particle reinforced epoxy composites: structure, thermal, mechanical, surface and high voltage breakdown strength properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 2795-2811.
- ASTM D570-98. (2005). Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. American Society for Testing Materials. West Conshohocken, PA.
- Aydar, E., & Akkaş, E. (2022). The emission of natural harmful particulate matters by wind erosion and possible impact areas, Cappadocia province, Central Anatolia, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81, 20.
- Benavente, D., Del Cura, M. G. A., Fort, R., & Ordóñez, S. (1999). Thermodynamic modelling of changes induced by salt pressure crystallisation in porous media of stone. *Journal of Crystal Growth*, 204(1-2), 168-178.
- Benavente, D., Del Cura, M. G. A., Fort, R., & Ordóñez, S. (2004). Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74(1-2), 113-127.
- Chen, Z., Liu, X., Chen, H., Li, J., Wang, X., & Zhu, J. (2023). Application of epoxy resin in cultural relics protection. *Chinese Chemical Letters*, 35(4), 109194.
- Çiflikli, M. (2020). Hydrothermal alteration-related kaolinite/dickite occurrences in ignimbrites: an example from Miocene ignimbrite units in Avanos, Central Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1044.
- D'Arienzo, L., Scarfato, P., & Incarnato, L. (2008). New polymeric nanocomposites for improving the protective and consolidating efficiency of tuff stone. *Journal of Cultural Heritage*, 9(3), 253-260.
- da Fonseca, B. S., Pinto, A. F., Rucha, M., Alves, M., & Montemor, M. (2023). Damaging effects of salt crystallization on a porous limestone after consolidation treatments. *Construction and Building Materials*, 374, 130967.
- Diñçer, İ., & Bostancı, M. (2019). Capillary water absorption characteristics of some Cappadocian ignimbrites and the role of capillarity on their deterioration. *Environmental Earth Sciences*, 78, 7.
- Erguler, Z. A. (2009). Field-based experimental determination of the weathering rates of the Cappadocian tuffs. *Engineering Geology*, 105(3-4), 186-199.
- Garcia-Vallès, M., Topal, T., & Vendrell-Saz, M. (2003). Lichenic growth as a factor in the physical deterioration or protection of Cappadocian monuments. *Environmental Geology*, 43, 776-781.
- Granneman, S. J., Lubelli, B., & van Hees, R. P. (2019). Mitigating salt damage in building materials by the use of crystallization modifiers—a review and outlook. *Journal of Cultural Heritage*, 40, 183-194.
- Jia, M., He, L., Pan, A., Ma, X., Huang, S., & Simon, S. (2021). Silica-based hybrids for adhesive coatings and their anti-salt damage in the protection of ancient sandstone. *Progress in Organic Coatings*, 151, 106037.
- Kaşmer, Ö., Ulusay, R., & Geniş, M. (2013). Assessments on the stability of natural slopes prone to toe erosion, and man-made historical semi-underground openings carved in soft tuffs at Zelve Open-Air Museum (Cappadocia, Turkey). *Engineering Geology*, 158, 135-158.
- Korkanç, M. (2007). İğnimbitlerin jeomekanik özelliklerinin yapı taşı olarak kullanımına etkisi: Nevşehir taşı. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 31(1), 49-60.

- Korkanç, M., & Solak, B. (2016). Estimation of engineering properties of selected tuffs by using grain/matrix ratio. *Journal of African Earth Sciences*, 120, 160-172.
- Luan, X. X., Xu, C. C., Wang, Z. S., & Ji, J. (2008). Preservation effect of modified waterborne epoxy resin emulsion for stone historical relic. *Corrosion and Protection*, 29(8), 451-453.
- Lubelli, B., Hees, R. v., Groot, C., & Gunneweg, J. (2007). Risks of the Use of Water Repellents on Salt Contaminated Masonry: the Case of a Windmill in the Netherlands. *Restoration of Buildings and Monuments*, 13(5), 319-330.
- Moon, V. G. (1993). Microstructural controls on the geomechanical behaviour of ignimbrite. *Engineering Geology*, 35(1-2), 19-31.
- Moropoulou, A., Kouloumbi, N., Haralampopoulos, G., Konstanti, A., & Michailidis, P. (2003). Criteria and methodology for the evaluation of conservation interventions on treated porous stone susceptible to salt decay. *Progress in Organic Coatings*, 48(2-4), 259-270.
- Özşen, H., Bozdağ, A., & İnce, İ. (2017). Effect of salt crystallization on weathering of pyroclastic rocks from Cappadocia, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 258.
- Pinna, D., Salvadori, B., & Porcinai, S. (2011). Evaluation of the application conditions of artificial protection treatments on salt-laden limestones and marble. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2723-2732.
- Raneri, S., Barone, G., Mazzoleni, P., & Rabot, E. (2016). Visualization and quantification of weathering effects on capillary water uptake of natural building stones by using neutron imaging. *Applied Physics A*, 122, 969.
- Ruffolo, S. A., La Russa, M. F., Ricca, M., Belfiore, C. M., Macchia, A., Comite, V., Pezzino, A., & Crisci, G. M. (2017). New insights on the consolidation of salt weathered limestone: the case study of Modica stone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76, 11-20.
- Sahu, R., Gupta, M. K., Chaturvedi, R., Tripaliya, S. S., & Pappu, A. (2020). Moisture resistant stones waste based polymer composites with enhanced dielectric constant and flexural strength. *Composites Part B: Engineering*, 182, 107656.
- Scherer, G. W. (1999). Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1347-1358.
- Scherer, G. W., Flatt, R., & Wheeler, G. (2001). Materials science research for the conservation of sculpture and monuments. *MRS Bulletin*, 26(1), 44-50.
- Topal, T., & Doyuran, V. (1997). Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff. *Engineering Geology*, 47(1-2), 175-187.
- Topal, T., & Doyuran, V. (1998). Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey. *Environmental Geology*, 34, 5-20.
- TS EN 1936. (2010). Türk Standartları, Doğal Taşlar Deney Metotları, Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik. TSE, Ankara.
- TS EN 12370. (2001). Doğal Taşlar-Deney metotları-Tuz kristalleşmesine direncin tayini. TSE, Ankara.
- Url1. (2024). Öz kapadokya doğal sarıtaş kimyasal özellikleri. <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.ozkapadokya.com.tr%2Fstorage%2Fapp%2Fmedia%2Fbelgeler%2Foz-kapadokya-saritas-analiz.docx&psig=AOvVaw2BudimwRVCxExTf9-xEcRL&ust=1727539155783000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CAQQn5wMahcKEwjIx4yCv-OIAxUAAAAAHQAAAAAQBA> (Erişim tarihi:27.09.2024).
- Url2. (2024). <https://brtr-kimya-as.business.site/> (Erişim tarihi:27.09.2024).
- Vacchiano, C. D., Incarnato, L., Scarfato, P., & Acierno, D. (2008). Conservation of tuff-stone with polymeric resins. *Construction and Building Materials*, 22(5), 855-865.
- Walker, G. P. (1983). Ignimbrite types and ignimbrite problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17(1-4), 65-88.