

## Polyester Reçine ve Sille Taş Tozu Esaslı Kompozit Harçlarının Karakterizasyonu

Ahmet Cihat ARI <sup>1\*</sup>, Mustafa TOSUN <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yozgat Bozok Üniversitesi, Akdağmadeni Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Yozgat, Türkiye

<sup>2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Konya, Türkiye

Sorumlu Yazar/Corresponding Author  
e-mail: a.cihat.ari@bozok.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article  
Geliş Tarihi/Received: 29.09.2024  
Kabul Tarihi/Accepted: 26.05.2025

### Öz

Andezit özellikleri gösteren Sille taşı, Konya'daki tarihi yapıların restorasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu taş, uzun süreli doğal ve çevresel etkilere maruz kalması nedeniyle bozulmaya açıktır. Bu tür hasarları önlemek amacıyla geliştirilen restorasyon stratejileri arasında onarım harçları önemli bir yer tutmaktadır. Tarihi yapılarda kullanılan taşların farklı yapısal özelliklere sahip olması nedeniyle, uyumlu onarım harçlarının geliştirilmesinde taşın özelliklerinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Sille taşı tozu (SSP) ile polyester reçine (PR) farklı oranlarda karıştırılarak elde edilen kompozit harçların mekanik, fiziksel ve mikro yapısal özellikleri araştırılmıştır. Amaç, Sille taşıyla uyumlu onarım harçları geliştirmek ve taş kesiminden kaynaklanan SSP atıklarını ekonomik değeri olan ürünlere dönüştürmektir. Bu doğrultuda, SSP'ye ağırlıkça %30, %35 ve %40 oranlarında saf polyester reçine eklenmiştir. Mekanik özellikler; basınç dayanımı, üç nokta eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve sertlik testleri ile değerlendirilmiştir. Fiziksel özellikler ise boşluk oranı ve su emme testleri ile belirlenmiştir. Mikro yapı analizleri SEM-EDS ve FTIR yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, kompozit harçların yapısal dayanımı artırma, su geçirmezlik sağlama ve estetik görünümü koruma açısından önemli potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Test edilen karışımlar arasında %40 PR ve %60 SSP içeren harç, en uygun mekanik ve fiziksel özellikleri sergilemiştir. Bu oran, hem restorasyon uygulamalarında yüksek performans sağlamış hem de SSP atıklarının sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesine katkı sunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit harç, restorasyon, Sille taşı, tarihi yapı onarımı, harç karakterizasyonu

## Characterization of Polyester Resin and Stone Powder Based Composite Mortars

### Abstract

Sille stone, exhibiting andesitic properties, is widely used in the restoration of historical structures in Konya, Türkiye. However, due to long-term exposure to natural and environmental factors, this stone is prone to deterioration. Repair mortars are among the common restoration strategies developed to prevent such damage. Since stones used in historical structures vary in composition, understanding their properties is crucial when developing compatible repair mortars. This study investigates the mechanical, physical, and microstructural properties of composite mortars produced by mixing Sille stone powder (SSP) with polyester resin (PR) at different ratios. The goal is to develop repair mortars compatible with Sille stone while also utilizing SSP waste from stone cutting as a value-added product. Pure polyester resin was mixed with SSP at 30%, 35%, and 40% by weight. Mechanical properties were evaluated through compressive strength, three-point flexural strength, tensile strength, and hardness tests. Physical properties were assessed via porosity and water absorption tests. Microstructural analyses were performed using SEM-EDS and FTIR techniques. Test results indicated that composite mortars have significant potential to enhance structural strength, improve water impermeability, and preserve aesthetic appearance. Among the tested ratios, the mixture containing 40% PR and 60% SSP exhibited the most favorable mechanical and physical properties. It was concluded that this ratio not only ensures better performance in restoration applications but also contributes to sustainability by reducing SSP waste and converting it into a cost-effective restoration material.

**Anahtar Kelimeler:** Composite mortar, restoration, Sille stone, historical building repair, mortar characterization

### Cite as;

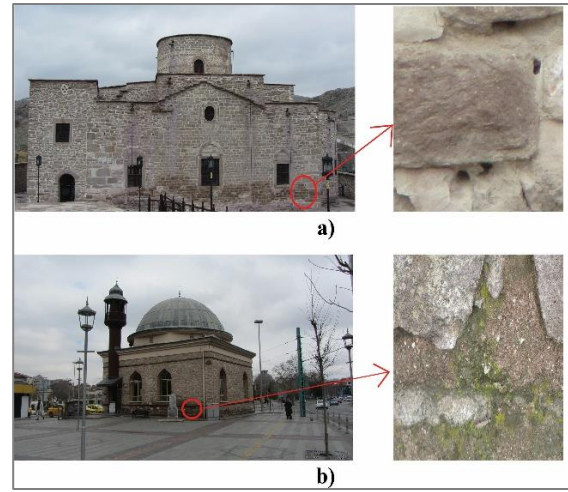
Arı, A.C., ve Tosun, M. (2025). Polyester reçine ve sille taş tozu esaslı kompozit harçlarının karakterizasyonu. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 195-219. Doi: 10.53501/rteufemud.1558098

## 1. Giriş

Harçlar, yapı elemanlarının yapılması, duvarların doldurulması veya kaplanması gibi çeşitli yapı işlerinde kullanılmaktadır. Antik çağlardan günümüze değin yapıların inşaatlarında, farklı bağlayıcı tiplerde harçlar kullanılmıştır. Geleneksel harçların bileşenleri, coğrafi bölgeler ve zamana göre farklılık göstermiştir. Geçmişte yapıların inşasında çamur, alçı ve kireç en yaygın bağlayıcılar olmuştur (Curulli vd., 2020). Bağlayıcılar içerisinde kireç esaslı harçlar, geçmişte yapıların restorasyonunda birkaç yüzyıl boyunca kullanılmıştır. Ancak bu harçların yavaş sertleşme süresi ve düşük dayanımı, anıtlarda önemli bozulma ve tahribatın hızlanmasına neden olmuştur. Günümüzde polimer esaslı harçlar hızlı sertleşme özelliği ve geleneksel harçlara göre yüksek dayanımı nedeniyle restorasyon projelerinde tercih edilmektedir (Arandigoyen ve Alvarez, 2007).

Konya ili tarihsel süreç içerisinde Selçuklu ve Osmanlı devletlerinin yaptıkları anıtsal yapıları bulundurmaktadır. Anıtsal yapıların inşasında kullanılan taşta, doğal ve çevresel faktörler nedeniyle hasarlar oluşmaktadır (Şekil 1). Bu hasarlar malzemede, yeni mikro çatlaklara ve mineralojik değişikliklere neden olmasının yanı sıra, malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Konya'daki tarihi yapılarda iklimsel ve atmosferik etkenler sonucu korozyon, çürüme gibi hasarlar giderek artmakta, bu da taşıyıcı sistemlerinin dayanımını azaltmaktadır. Taşıyıcı sistemlerinde oluşan bu hasarlar, tarihi yapıların yok olma tehlikesiyle karşı karşıya kalmasına neden olmaktadır. Anıtlarda oluşan hasarları önleyebilmek ve yapının özgün değerlerinin korunması için restorasyon çalışmalarında onarım harçları kullanılmaktadır. Tarihi yapıların

restorasyon çalışmalarında kullanılan onarım harçları; tarihi, estetik, yapısal ve tipolojik özelliklerinin korunarak onarımlarının yapılması, geleneksel malzeme arasındaki uyumu açısından önemlidir. Onarım harçları, tarihi yapıların yüzeylerinde oluşan çatlak ve oyukların onarımında kullanılmadan önce, malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir (Alpsalaz, 2025; Demirdag, 2013).



**Şekil 1.** (a) Aya Elenia Kilisesi-Konya, (b) Ak Camii-Konya (Kırmızı daire içinde taşta doğal ve çevresel faktörler nedeniyle oluşan hasarlar gösterilmiştir.)

**Figure 1.** (a) Hagia Elenia Church-Konya, (b) White Mosque-Konya (Damages caused to the stone due to natural and environmental factors are shown in the red circle.)

Konya'daki tarihi yapıların inşa edilmesinde Sille bölgesinden çıkarılan taşlar kullanılmıştır. Sille taşı, Sulutaş volkanitleri olarak adlandırılmakta andezit, dasit, riyodasit ve riyolit yapıları bir kayaç olup, pembe, gri ve kahve renkleri bulunmaktadır (Eren, 1993). Sille taşının işlenmesi kolay ve kent merkezine yakın konumdan çıkarılması nedeniyle, tarihi yapıların inşasında tercih edilmiştir. Ancak Sille taşında çatlama, tuz kristalleşmesi, erozyon, çiçeklenme ve rutubet gibi nedenlerden dolayı hasarlar ve bozulmalar

meydana gelmektedir (Alpsalaz vd., 2025; Hatir vd., 2020). Literatürde Sille taşında meydana gelen hasarlar araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Hatir vd. (2020), Konya'daki tarihi yapıların taşlarındaki bozulma nedenlerinin belirlenmesinde, yapay zekâ tabanlı yöntem kullanılarak Sille taşının bozulma görüntüleri sınıflara ayrılmış, yapı taşlarının bozulma tiplerini tanımadaki performansları karşılaştırılmıştır. Zedef vd. (2007), Konya'daki tarihi yapıların yapımında kullanılan taşların atmosferik etkenlerle tuz kristalleşmesi hasarlarını gözlemlemiş, yapı taşlarının hasarlara bağlı olarak fiziksel, mikroyapı, kimyasal ve petrografik özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiğini tespit etmişlerdir. Fener ve İnce (2015), Sille taşıyla inşa edilen kültürel mirasların yapı taşında, donma-çözülme döngüsü kaynaklı hasarların ve bozulmaların oluşmasında, yapı taşının yüksek boşluk oranının etkili olduğunu belirlemişlerdir. Aynı çalışmada tarihi yapıların temel duvarlarına su girmesinin engellenmesi için Sille taşının donma-çözülme döngüsü kaynaklı hasarların azaltılmasının gerektiği belirtilmiştir.

Onarım harçlarının özelliklerini etkileyen unsurlardan örneğin harçların gözenek yapısı, su geçirimsizliği harcın yüzeye yapışma dayanımını etkilemektedir. Harçların su emme direncinin artırılması, onarımın görünümünü olumsuz etkilememesi için önemlidir (Klasińska-Kopacz vd., 2010). Tarihi yapıların harçlarında kullanılan ince agrega ve bağlayıcılar neme karşı direncini ve mekanik özelliklerini etkilemektedir (Pozo-Antonio, 2015). Tarihi yapıların restorasyon uygulamalarında kullanılacak onarım harçlarının duvarlarla mekanik, fiziksel ve kimyasal uyumluluk

sağlamasının yanı sıra, genleşme kaynaklı oluşan bozulmalara dayanıklı olması gerekmektedir. Günümüzde polimer üretim teknolojisindeki gelişmeler neticesinde, farklı özellikte onarım harçları ortaya çıkmıştır. Bu onarım harçları, yapıların dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü sağlamak için önemli yere sahiptir (Faria vd., 2008). Polimerlerin; ekonomik olması, kolay işlenebilirlikleri, yüksek mekanik özellikleri, termal ve boyutsal kararlılıkla harç yapımında tercih edilmesini sağlamıştır (Sanchez vd., 2000). Literatürde farklı bileşim ve özelliklere sahip polimer katkılı harçların üretildiği görülmektedir. Roig-Salom vd. (2003), tarihi mermer kaplamalı çeşmelerin restorasyonu için polimer reçine (epoksi, polyester) ile mermer tozuyla hazırlanan harçların, doğal mermerlere göre daha yüksek dayanım ve biyolojik saldırılara karşı dayanıklı olduğunu tespit etmişlerdir. Haach vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, harçların içerisindeki su/çimento oranının ve agrega tane boyutunun artmasının harçların elastisite modülünün azalmasına neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Di Bella vd. (2014) tarafından yapılan araştırmada, kireç esaslı harçların içerisine kenaf, sisal ve polipropilen elyafların eklenmesinin harçların mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Kenaf ve sisal eklenen harçlar kullanıldığında yüzeysel çatlakların azaldığı, doğal liflerle yapılan harçların ise hidrofilik yapısı nedeniyle polipropilen liflerle yapılan harçlara göre daha düşük ağırlık kaybı olduğu belirlenmiştir. Doan vd. (2018), atık taş tozlarının içerisine polyester bağlayıcı polimer malzeme karıştırarak kompozit malzemenin potansiyelini değerlendirmiş; öğütülmüş parçadan mermer tozu kullanılan numunelerin dayanımının kurutulmuş bulamaçtan elde edilen toza

kıyasla daha yüksek olduğu, taş tozu esaslı kompozitlerin su emme oranının düşük olduğu ve taş tozlarının polimer kompozitlerin termal stabilitesini geliştirdiği tespit edilmiştir. Zheng vd. (2019), harçların içerisine polimer ilavesiyle, dayanımının arttığı, gözenek oranının azaldığı, polimer parçacıklarının çimentonun hidrasyonunun hızında önemli etkisi olduğu ifade edilmiştir. Jain vd. (2019), granit kesme atığı içeren kendiliğinden yerleşen betonun, sürdürülebilir karışımlar oluşturmak için verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Gupta ve Vyas (2018), atık granit tozu katkılı harcın, C-S-H yapısı arttırdığı, geleneksel harçlara göre üstün performans özellikleri nedeniyle yapıların sıva işlerinde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Literatürdeki çalışmalara göre, kompozit harçlarının yapımında polimer malzemeler kullanılarak, yapının dayanımının arttığı ve korozyona karşı direnç sağladığı belirtilmiştir.

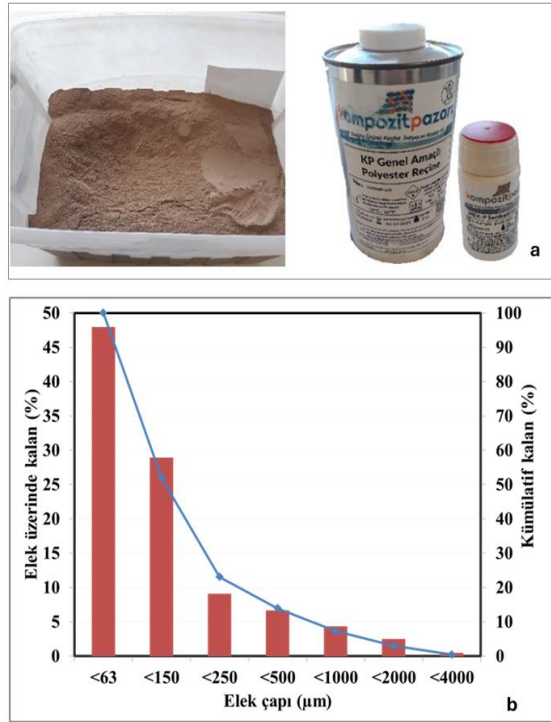
Malzeme biliminin ilerlemesiyle, polimer katkılı harçlar geliştirilmekte ve bu harçların onarım performansının yüksek olması nedeniyle, tarihi yapıların restorasyon çalışmalarında tercih edilmektedir. Bu polimer katkılı harçlar, hem tarihi yapıların malzemesiyle uyumlu, hem de suya ve neme karşı dayanıklıdır (Arı vd., 2024; Demir vd., 2025). Bu çalışmada, Konya'dan temin edilen volkanik kökenli Sille taşı'nın tozu polyester matris ile karıştırılarak kompozit harçlar üretilmiş, bu kompozit harçların fiziksel, mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Literatür araştırmasına göre, Sille taşının mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmakla beraber tarihi yapıların restorasyon çalışmalarında kullanılmak üzere onarım harçlarının geliştirilmesi ile

ilgili çalışmalara rastlanılmamıştır. Literatürde yeterli sayıda çalışma bulunmaması ve mevcut bilgi boşluğunu doldurmak için Sille taş tozu ve polyester bağlayıcı onarım harçlarının özellikleri araştırılmıştır. Kompozit harçlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde; basınç dayanım testi, üç noktalı eğilme dayanım testi, çekme dayanım testi ve sertlik tayini yapılmış; fiziksel özellikleri için boşluk tayini ve su emme testi uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerin mikroyapı özelliklerinin belirlenmesinde; SEM-EDS ve FTIR analizleri yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Çalışmada onarım harçlarının hazırlanması ve karakterizasyonu için deneysel yöntem uygulanmıştır. Onarım harçlarında kullanılan Sille taş tozu (STT) Konya/Sille Bölgesinde taş üretimi yapan taş ocağı firmasından temin edilmiştir (Şekil 2a). Sille taşları yapı malzemeleri olarak kullanılmadan önce çeşitli boyutlarda şekil verilmesi sebebiyle ocakta biriken taş tozları bu çalışma kapsamında deney çalışmaları için değerlendirilmek amacıyla ocaktan toplanarak tedarik edilmiştir. Ocaktan alınan STT'nin tane boyutu dağılımı için elek analizi yapılmıştır. Taş tozu, bir elek cihazı (Retsch AS 200) ve farklı boyutlardaki elekler (63, 150, 250, 500, 1000, 2000 ve 4000 µm) kullanılarak elenmiştir. Elek seti aparatlarının her birine 100 gr STT yerleştirilmiş ve ardından 10 dakika boyunca sarsma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin sonunda, her elekte kalan toz tartılmış ve kaydedilmiştir. STT'nin tane boyutu dağılımında, taneciklerin yaklaşık yarısı 63 µm'nin altındayken, taneciklerin % 10'dan azı 500 µm'den büyüktür (Şekil 2b).



**Şekil 2.** (a) Deney çalışmalarında kullanılan STT, PR ve MEK-P, (b) STT'nin tane boyut dağılımı

**Figure 2.** (a) SSP, PR and MEK-P used in experimental studies, (b) Particle size distribution of SSP

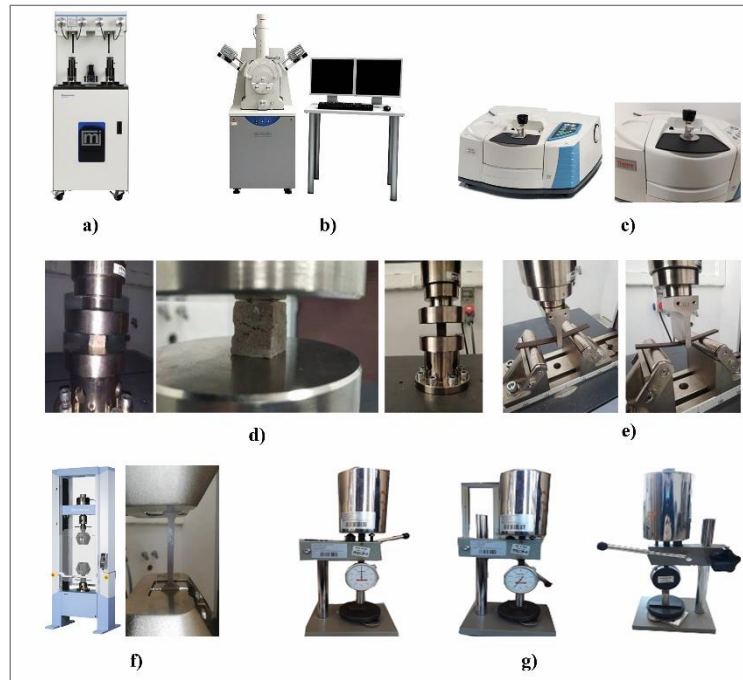
Literatürde araştırmacıların, atık taş tozunun tane boyutu analizi ile ilgili inceleme yaptıkları görülmektedir. Örneğin Arı (2025) tarafından yapılan araştırmada, atık ignimbirit taş tozu taneciklerinin yaklaşık % 35'i 63  $\mu m$  boyutunun altında iken, taneciklerin yaklaşık % 10'dan azının ise 1000  $\mu m$  boyutundan daha büyük olduğu belirlenmiştir. Yurt vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, bazalt tozunun ortalama tanecik boyutu 50  $\mu m$  olarak bulunmuştur. Vijayalakshmi vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, atık granit tozunun % 55'inin 150  $\mu m$  altında ve taneciklerin % 31'inin 45

$\mu m$ 'den küçük olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla STT tane büyüklüğünün dağılımında iri tanecik oranı az, ince tanecik oranının yüksek olması, literatürdeki ilgili çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir. Çalışmada kompozit malzemelerin üretiminde ağırlıkça % 0,2 oranında % 6'lık kobalt oktoat hızlandırıcı içeren polyester reçine (PR) (Kompozit Pazarı, Türkiye) kullanılmıştır. PR'yi sertleştirmek için metil etil keton peroksit (MEK-P) (Kompozit Pazarı, Türkiye) kullanılmıştır. Polyester reçine sarımsı renkli olup jelleşme süresi 4-8 dk., yoğunluğu ise 1,14 g/cm<sup>3</sup>'dir.

Çalışmada kompozit harç serisinde sertleştirilmiş saf PR ve PR katkılı kompozit numuneler yapılmıştır. Sertleştirilmiş saf PR numunesinin hazırlanması için kobalt oktoat hızlandırıcı içeren PR'ye, ağırlıkça %1,5 oranında metil etil keton peroksit sertleştirici ilave edilmiş ve bu karışım 3 dk. karıştırılmıştır. STT içerisine ağırlıkça saf PR %30, %35 ve %40 oranında eklenerek PR/STT kompozit harçları hazırlanmıştır. Elde edilen PR/STT karışımlarının her biri 3 dk. karıştırılmış, ardından tüm karışımlara ağırlıkça %1,5 metil etil keton peroksit sertleştirici ilave edilmiş (Tablo 1), her biri 3 dk. karıştırılmıştır. PR/STT harçları geleneksel el yatırma tekniği ile polimetil metakrilat (PMMA) kalıplara dökülerek hazırlanmış ve oda sıcaklığında 24 saat kurutulmuştur. Deney çalışmalarında kullanılan cihazların ve test örneklerinin fotoğrafları Şekil 3'te gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Çalışma kapsamında hazırlanan test örneklerinin karışım oranları ve karışım bileşenleri**Table 1.** *Mixing ratios and mixture components of test samples prepared within the scope of the study)*

| Numunelerin No | STT<br>(Ağırlıkça % Oranı) | PR<br>(Ağırlıkça % Oranı) | MEK-P<br>(Ağırlıkça % Oranı) |
|----------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|
| PR             | 0                          | 100                       | 1,5                          |
| PR/STT-1       | 60                         | 40                        | 1,5                          |
| PR/STT-2       | 65                         | 35                        | 1,5                          |
| PR/STT-3       | 70                         | 30                        | 1,5                          |

**Şekil 3.** Deney çalışmalarında uygulanan testler; (a) Civalı porozimetre, (b) SEM-EDS (Hitachi – SU 1510), (c) FTIR (Thermo Scientific – Nicolet iS20), (d) Basınç testi (SHIMADZU AGS-X), (e) Üç noktali eğilme testi, (f) Çekme testi, (g) Shore-D sertlik cihazı**Figure 3.** *Tests applied in experimental studies; (a) Mercury porosimeter, (b) SEM-EDS (Hitachi – SU 1510), (c) FTIR (Thermo Scientific – Nicolet iS20), (d) Compression test (SHIMADZU AGS-X), (e) Three-point bending test, (f) Tensile test, (g) Shore-D hardness tester*

## 2.2. Metot

### 2.2.1. Boşluk Tayini

Tarihi yapıların restorasyonlarında kullanılan onarım harçlarının boşluk miktarı ve boyut dağılımının büyüklüğü, yapı malzemesinin su emme oranını etkilemektedir. Emilen su ile birlikte malzeme yüzeyinde, sıcaklığa bağlı olarak genleşme–büzülme olaylarından dolayı, tuz kristalleşmesi meydana gelmekte, yapılarda

hasarlara neden olmaktadır. Dış ve iç mekânlarda kullanılacak onarım harçlarının, yapılarda oluşan hasarları önleyebilmek için kompozit malzemenin boşluk çapı ve dağılımının tespit edilmesi gerekmektedir. Malzemenin boşluk çapı dağılımının belirlenmesinde, civalı porozimetre yöntemi kullanılmaktadır. Çalışmada kompozitlerin boşluk miktarları civalı porozimetre (Micromeritics–Autopore 4) ile ölçülmüştür. Civalı

porozimetre, numunelerin boşluk boyutu ve dağılımının belirlenmesini sağlamaktadır. Numunelerin boşluk miktarının ölçümünde civa ve yeterli basınç kullanılarak, numunenin ince boşluklarına nüfus edilmektedir. Uygulanan basınçla birlikte civanın azalmasıyla, numunelerin boşluk boyutu hesaplanmaktadır (URL-1). Numunelerin boşluk tayini ASTM D2734 standardına göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 3a).

### 2.2.2. Su Emme Testi

Tarihi yapıların restorasyonunda kullanılmak üzere geliştirilen onarım harçlarının, nem ve yoğuşmadan dolayı hasarların önüne geçilmesinde, malzemenin su emme miktarının belirlenmesi önemlidir. Onarım harçlarının absorbe ettiği su miktarı, su emme deneyi ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin su emme miktarının ölçülmesinde şu aşamalar uygulanmıştır. Oda sıcaklığındaki (23°C'de) numunelerin, kuru ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla 0,001 g hassasiyetli hassas terazide ölçülen ağırlık değerleri not edilmiş ve ardından numuneler saf su dolu beherlere konulmuştur. Numunelerin su emme miktarları ASTM D 570'e uygun olarak ölçülmüş, numuneler 24 saat sonra sudan çıkarılmıştır. Daha sonra sudan çıkarılan numunelerin 0,001 g hassasiyetli terazide ölçülen değerleri not edilmiştir. Son olarak numunelerin su emme ağırlığı ile kuru ağırlığı arasındaki fark tespit edilmiştir. Su emme yüzdesi Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır (Bakshi vd., 2020).

$$SuEmme(\%) = \left( \frac{W_1 - W_2}{W_2} \right) * 100 \quad (1)$$

Burada  $W_1$  numunenin su emmiş ağırlığı ve  $W_2$  numunenin kuru ağırlığıdır.

### 2.2.3. SEM-EDS

SEM analiziyle, kompozit harçlarının morfolojisi ve malzemedeki STT oranının artırılmasına bağlı olarak meydana gelen değişimler belirlenmiştir. EDS analiziyle numunelerin içerisindeki elementler tespit edilmiştir. Tungsten filament ile çalışan SEM cihazı, kompozitlerin yapısını ve şekil bozukluklarının yüzey taramasını yaparak malzemenin morfolojisi ortaya çıkarılmıştır. Cihaz üzerinde yansıyan elektron demetleri ve X ışınları dedektörüyle numunelerin elementer analizleri yapılmıştır (URL-2). Bu analizler Hitachi-SU 1510 SEM-EDS cihazıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3b). SEM-EDS analizinde numuneler 10x10x4 mm boyutlarında kullanılmıştır. Bu analizlerde yalıtkan numunelerinin daha iyi incelenebilmesi için, yüzeyleri ince bir katman halinde altınla kaplanmıştır.

### 2.2.4. FTIR

Kompoziti oluşturan atomlar ve moleküller arasındaki kimyasal bağın kuvveti, mekanik özelliklerindeki değişimin ana nedenleridir. Bu bağların kuvveti FTIR analiziyle açıklanmaktadır. Örneğin Ari ve Oral (2025) tarafından yapılan çalışmada, polyester reçine/ignimbrit taş tozu kompozit harçlarının mekanik özelliklerindeki değişimin açıklanmasında FTIR analizi kullanmışlardır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında geliştirilen kompozit harçların mekanik özelliklerindeki değişimi açıklayabilmek için FTIR analizi yapılmıştır. Kompozit harçlarının molekül bağlarının özellikleri Thermo Scientific-Nicolet iS20 model FTIR cihazıyla belirlenmiştir (Şekil 3c). Numunelerin FTIR analizi şu şekilde yapılmıştır: Cihaz tarafından numuneler üzerine kızıl ötesi ışınlar gönderilmiştir.

Gönderilen ışınların numuneler tarafından soğurulmasıyla, molekül bağlarında oluşan titreşimler ve dönüşlerindeki dalga enerjileri tespit edilmiştir. FTIR analiziyle malzemenin mikro yapısı hakkında bilgi edinilmiştir. Bu deney, onarım harçlarının geliştirilmesi ve malzemenin kalite kontrolü açısından yarar sağlamıştır (URL–3).

### 2.2.5. Basınç Dayanım Testi

Numunelerin basınç yüklemesi altındaki mekanik dayanımını tespit etmek için basınç dayanım testi gerçekleştirilmiştir. Numuneler ASTM D695 standardında ve polimetil metakrilat (PMMA) kalıbında 20x20x20 mm boyutlarında 5 adet üretilmiş, 0,5mm/dk hızında basınç dayanım testi SHIMADZU AGS-X cihazı ile uygulanmıştır. Basınç dayanım testi sırasında numuneler paralel plakalar arasına yerleştirilmiştir. Bu plakalar numuneyi zıt taraflardan içeri doğru kuvvetle sıkıştırır. Bu sıkıştırma işlemi sırasında oluşan deformasyon ve kuvvet ölçülerek numunelerin basınç dayanımı belirlenir (Şekil 3d). Numunelerin basınç dayanımını Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_b = Fmax/Ao \quad (2)$$

Burada  $\sigma_b$  numunenin basınç dayanımı (MPa),  $Fmax$  numunenin en büyük basınç kuvveti (N) ve  $Ao$  numunenin başlangıç kesit alanıdır (mm<sup>2</sup>).

### 2.2.6. Üç Noktalı Eğilme Dayanım Testi

Çalışmada kompozit harçlarının farklı yükleme durumlarında mekanik özelliğini belirlemek için üç noktalı eğilme dayanım testi yapılmıştır. Numuneler, ASTM D790 standardında ve 4x13x165 mm boyutlarında, polimetil metakrilat (PMMA)

kalıbında 5 adet üretilmiş, 0,2 mm/dk hızında üç noktalı eğilme testi SHIMADZU AGS-X cihazı ile uygulanmıştır (Şekil 3e). Yapıda kiriş olarak kullanılan malzemeler eğilmeye maruz kalmaktadır. Üç noktalı eğilme dayanım testinin temel prensibi, uygulanacak numuneyi basit kiriş modeli olarak kabul etmeye dayanmaktadır (Morgül, 2015). Malzemenin dayanımı bulunurken, numune cihaz içerisine yatay pozisyonda mesnetler üzerine konularak, yük tam orta noktadan uygulanmıştır. Kompozit malzemenin deney süresince, kuvveti artırılarak test numunesinde tam ortasında meydana gelen sehim değeri ölçülmüştür (URL–4). Numunelerin eğilme dayanımı Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{3Neğ} = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (3)$$

Burada  $\sigma_{3Neğ}$  üç nokta eğilme dayanımı (MPa),  $F$  kırılma yükü (N),  $L$  alt mesnetler arası açıklık (mm),  $b$  numunenin genişliği (mm) ve  $d$  numunenin kalınlığıdır (mm).

### 2.2.7. Çekme Dayanım Testi

Çekme dayanım testi, kompozit harçlarının dayanımını, harçlarla duvar arasındaki yapışma kuvvetinin incelenmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu testle; malzemenin gerilme ve çekme dayanım özellikleri tespit edilmektedir. Çekme dayanım testi, kompozit malzemenin yatay yönde uygulanan kuvvet karşısındaki gerilmelerinin tespiti için yapılmıştır. Numuneler ASTM D638 standardında ve 19x115x4 mm boyutlarında polimetil metakrilat (PMMA) kalıbında hazırlanmıştır. Her bir karışım oranından 5 adet üretilerek SHIMADZU AGS-X cihazı ile numunelere 0,2 mm/dk hızında çekme testi yapılmıştır. Kompozit numunelere çekme testi yapılırken test cihazının alt ve

üst kısımları arasına yerleştirilmiş ve gittikçe artan yük düzeyiyle kırılma anına kadar çekilmiştir. Uygulanan yük düzeyi ile buna karşı malzemenin gösterdiği uzamalar cihazla ölçülerek belirlenmiştir. Test sonucu elde edilen yük ve uzama değerlerinden yararlanılarak çekme diyagramı elde edilmiştir (Şekil 3f) (URL–5). Numunelerin çekme dayanımı Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_c = F_{max}/A_o \quad (4)$$

Burada  $\sigma_c$  çekme dayanımı (MPa),  $F_{max}$  numunenin en büyük basınç kuvveti (N) ve  $A_o$  numunenin başlangıç kesit alanıdır ( $\text{mm}^2$ ).

### 2.2.8. Sertlik Testi

Polimer kompozit malzemelerin sertlikleri ve dayanıklılıkları ilave edilen dolgu maddesine göre değiştiğinden sertlik testi yapılmıştır. Numunelerin sertlik ölçümleri ASTM D2240 standardına göre Shore D sertlik ölçüm cihazında belirlenmiştir (Şekil 3g). Sertlik ölçüm cihazındaki dalma ucu, numune üzerine batırılmış ve dalma ucunun malzemeye yaptığı izin

hesaplanmasıyla ölçülmüştür. Sertlik testinde, malzemenin farklı yerinden beş defa ölçüm yapılarak, ortalama değerleriyle hesaplama yapılmıştır. Cihazdaki dalma ucu, standartlarca belirlenmiş yaylı sistem tarafından hareket ettirilmektedir. Numunedeki dalma ucunun bıraktığı derinlik miktarının büyüklüğü malzemenin sertlik değerini etkilemektedir (URL–6). Sert kompozit malzemelerde dalma ucunun bıraktığı derinlik miktarı az, yumuşak malzemelerde derinlik miktarı ise yüksektir.

## 3. Bulgular ve Tartışma

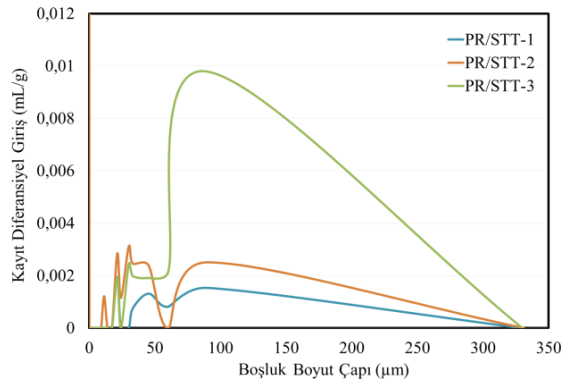
### 3.1. Boşluk Tayini Bulguları

PR/STT kompozitlerinin boşluk tayini Tablo 2’de, karşılaştırmalı grafik sonucu ise Şekil 4’te verilmiştir. Boşluk tayini deneyinde, PR/STT’nin boşluk çaplarının çoğunluğunun 0,002-0,01  $\mu\text{m}$  aralığında olduğu belirlenmiştir. PR/STT’nin en önemli doruk noktası 0,002  $\mu\text{m}$  civarında iken, ikinci doruk noktasının 0,002-0,01  $\mu\text{m}$  civarında olduğu görülmüştür (Tablo 2 ve Şekil 4).

**Tablo 2.** PR/STT kompozitlerinin boşluk tayini test verileri

**Table 2.** Void content test data of PR/SSP composites

| Boşluk özellikleri                            | PR/STT-1<br>(Ağırlıkça % Oranı)<br>(40:60) | PR/STT-2<br>(Ağırlıkça % Oranı)<br>(35:65) | PR/STT-3<br>(Ağırlıkça % Oranı)<br>(30:70) |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Toplam Giriş Hacmi (mL/g)                     | 0,0099                                     | 0,0093                                     | 0,0067                                     |
| Toplam Boşluk Alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | 3,503                                      | 2,511                                      | 0.000                                      |
| Medyan Boşluk Çapı (Hacim) ( $\mu\text{m}$ )  | 0,0119                                     | 0,0175                                     | 149,4929                                   |
| Medyan Boşluk Çapı (Alan) ( $\mu\text{m}$ )   | 0,0075                                     | 0,0073                                     | 80,8045                                    |
| Ortalama Boşluk Çapı (4V/A) ( $\mu\text{m}$ ) | 0,0113                                     | 0,0149                                     | 122,0541                                   |
| 0,55 psia'da Yığın Yoğunluk (g/mL)            | 1,7641                                     | 1,8383                                     | 1,7612                                     |
| Görünür (İskelet) Yoğunluk (g/mL)             | 1,7955                                     | 1,8704                                     | 1,7823                                     |
| Boşluk Yüzdesi (%)                            | 1,7449                                     | 1,7164                                     | 1,1867                                     |
| Kullanılan Kök Hacmi (%)                      | 1                                          | 1                                          | 1                                          |



**Şekil 4.** PR/STT kompozit harçlarının boşluk boyut dağılımı

**Figure 4.** Void size distribution of PR/STT composite mortars

Şekil 5'teki grafiğe göre, PR/STT kompozitlerinin boşluk yüzdesi incelendiğinde, tüm numunelerde STT miktarının artırılmasına bağlı olarak boşluk miktarı azalmaktadır. Polyester matrisin alana yayılarak taş tozunu kapladığı ve taş tozunun içerisine matrisin dağıldığını göstermektedir. PR/STT-3 numunesinin boşluk yüzdesinin diğer tüm kompozitlerden daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 5).

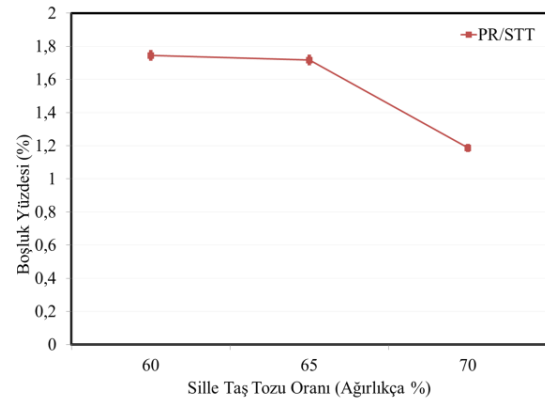
Tablo 3'te restorasyonda kullanılan harçların ve polimer katkılı onarım harçlarının boşluk yüzdesiyle ilgili literatürdeki bazı çalışmalar gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Restorasyonda kullanılan harçların ve polimer katkılı onarım harçlarının boşluk yüzdesiyle ilgili literatürdeki bazı çalışmalar

**Table 3.** Some studies in the literature on the porosity values of the mortars used in restoration and repair mortars with polymer additives

| Kullanılan Malzemeler                                  | Boşluk Yüzdeleri (%) | Kaynaklar                        |
|--------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Hava kireci harcı                                      | 16,51–30,63          | (Lanas ve Alvarez-Galindo, 2003) |
| Epoksi reçine ve kum ilaveli çimento harcı             | 0,54–23              | (Rahman ve Islam, 2012)          |
| Polietil akrilat stiren akrilamid esaslı çimento harcı | 12–23                | (Soufi vd., 2016)                |
| Kireç taşları ve portland puzolanik çimento harcı      | 22,50–39,70          | (Török ve Szemerey-Kiss, 2019)   |
| Polyester matris ve taş tozu esaslı kompozit harçlar   | 1,18–1,74            | Mevcut makalede                  |

Çalışmalar incelendiğinde, boşluk yüzdesi %0,54–39,70 arasında değişmektedir (Lanas ve Alvarez-Galindo, 2003; Rahman ve Islam, 2012; Soufi vd., 2016; Török ve Szemerey-Kiss, 2019). Onarım harçlarının özelliklerinin geliştirilmesinde epoksi, polyester ve vinil ester gibi polimerlerin eklenmesi boşluk yapısının iyileştirilmesine katkı sağlamıştır (Rahman ve Islam, 2012; Soufi vd., 2016). PR/STT'nin ölçülen boşluk yüzdesinin literatürdeki restorasyon harçlarından daha düşük boşluk yüzdesine sahip olduğu görülmüştür (Tablo 3).



**Şekil 5.** PR/STT kompozitlerinin boşluk yüzdesi (%)

**Figure 5.** Void percentage (%) of PR/STT composites

### 3.2. Su Emme Testi Bulguları

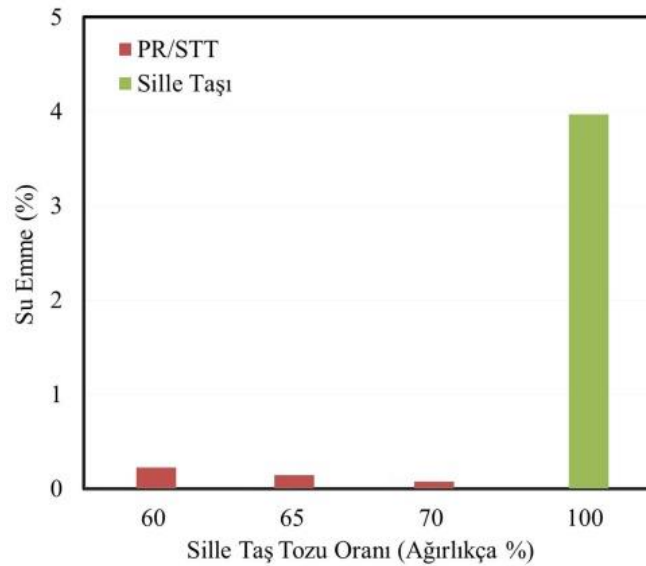
PR/STT kompozit harçlarının ve Sille taşının su emme testi sonuçları Tablo 4'te, karşılaştırmalı grafik sonucu ise Şekil 6'da verilmiştir. Tablo 4 ve Şekil 6'da görüldüğü gibi, PR/STT'nin su emme oranının, Sille taşının su emme oranına göre düşük olduğu

gözlemlenmiştir. Tüm PR/STT numuneleri arasında PR/STT-3 kompozitinin su emme oranının en düşük olduğu ve %0,072 olduğu belirlenmiştir (Tablo 4 ve Şekil 6). Bu sonuçlar, kompozit harçlarının boşluk tayini sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, benzer sonuçları vermektedir (Tablo 2 ve Tablo 4).

**Tablo 4.** PR/STT kompozitlerinin ve Sille taşının su emme oranı

**Table 4.** Water absorption rate of PR/SSP composites and Sille stone

| Numunelerin No | PR/STT Karışımlarının Oranı<br>(Ağırlıkça % Oranı) | PR/STT Kompozitlerinin ve Sille taşının Su Emme (%) |
|----------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| PR/STT-1       | 40:60                                              | 0,225                                               |
| PR/STT-2       | 35:65                                              | 0,145                                               |
| PR/STT-3       | 30:70                                              | 0,072                                               |
| Sille Taşı     | 0:100                                              | 3,968                                               |



**Şekil 6.** PR/STT kompozitlerinin ve Sille taşının su emme oranının değişimi

**Figure 6.** Change of water absorption rate of PR/SSP composites and Sille stone

Tablo 5'teki restorasyonda kullanılan harçların ve polimer katkıli onarım harçlarının su emme değerleriyle ilgili literatürdeki bazı çalışmalar gösterilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde, su emme değerleri %0,27–25 arasında değişmektedir (Alves vd., 2020; Korat vd., 2015; Martinez-Garcia vd., 2020; Rahman ve Islam, 2012). Onarım harçlarının özelliklerinin geliştirilmesinde, polimer

malzemenin matris içinde daha etkin bir şekilde dağılmasının su emme oranının azalmasına katkı sağlamıştır (Alves vd., 2020; Rahman ve Islam, 2012). Dolayısıyla PR/STT kompozit harçlarında da polimer matrisin dağılma etkinliği su emme oranının azalmasını sağlamakta ve bu yönüyle literatürdeki ilgili çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir (Tablo 5).

**Tablo 5.** Restorasyonda kullanılan harçların ve polimer katkılı onarım harçlarının su emme değerleriyle ilgili literatürdeki bazı çalışmalar*Table 5. Some studies in the literature on the water absorption values of the mortars used in restoration and repair mortars with polymer additives*

| Kullanılan Malzemeler                                                        | Su Emme Değerleri (%) | Kaynaklar                   |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Epoksi reçine ve kum ilaveli çimento harcı                                   | 0,5–3,5               | (Rahman ve Islam, 2012)     |
| Epoksi polimer, puzolanik çimento ve beyaz çimento ile yapılan kompozit harç | 0,27–13,72            | (Alves vd., 2020)           |
| Tüf, kuvars kumu ve etilsilikat ile yapılan onarım harcı                     | 14,5–22,8             | (Korat vd., 2015)           |
| Midye kabuğu agregaları ilaveli kireç harcı                                  | 10–25                 | (Martinez-Garcia vd., 2020) |
| Polyester matris ve taş tozu esaslı kompozit harçlar                         | 0,072–0,225           | Mevcut makalede             |

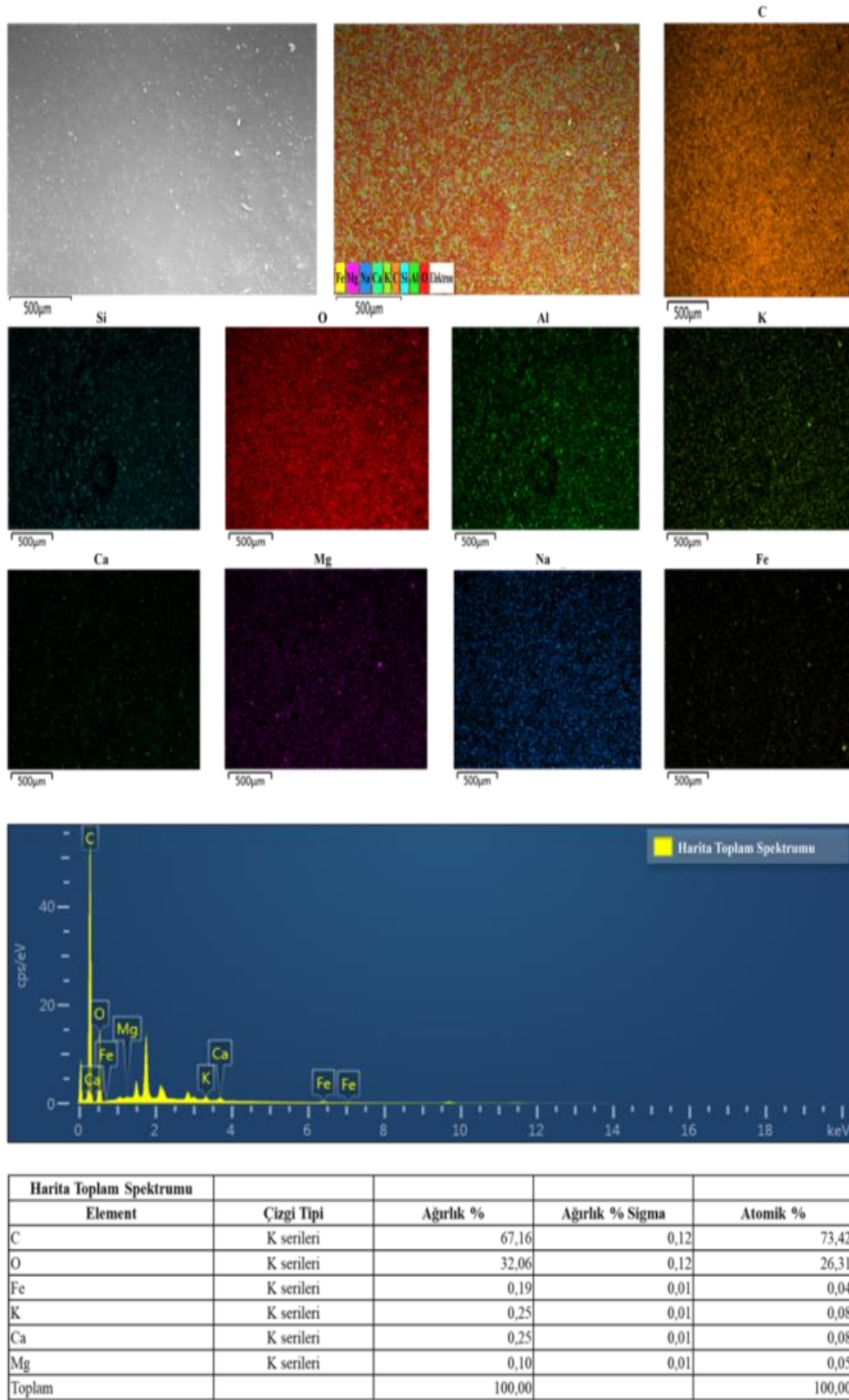
### 3.3. SEM-EDS Bulguları

PR/STT-1 numunesinin SEM-EDS analiz verileri Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7’de, PR/STT-1 numunesinde karbon (C) elementinin %67,16 ve oksijen elementinin (O) %32,06 oranlarıyla diğer elementlerden daha yoğun olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra aynı numunede silisyum (Si), alüminyum (Al), potasyum (K), demir (Fe), kalsiyum (Ca), sodyum (Na) ve magnezyum (Mg) elementlerinin toplam içeriği %1’ in altındadır. Kompozit numunenin içerisinde karbon ve oksijen elementlerinin polyester matrisine ait olduğunu göstermektedir. Ancak Sille taşındaki bazı bileşiklerin karbonatlaşması nedeniyle karbon, oksijen ve diğer elementler de taş tozunun bileşiklerinde bulunmaktadır. Bununla birlikte kompozitin 500 µm büyütme SEM görüntüsü incelendiğinde, matris ile dolgu arasında meydana gelen topaklaşmalar görülmektedir (Şekil 7).

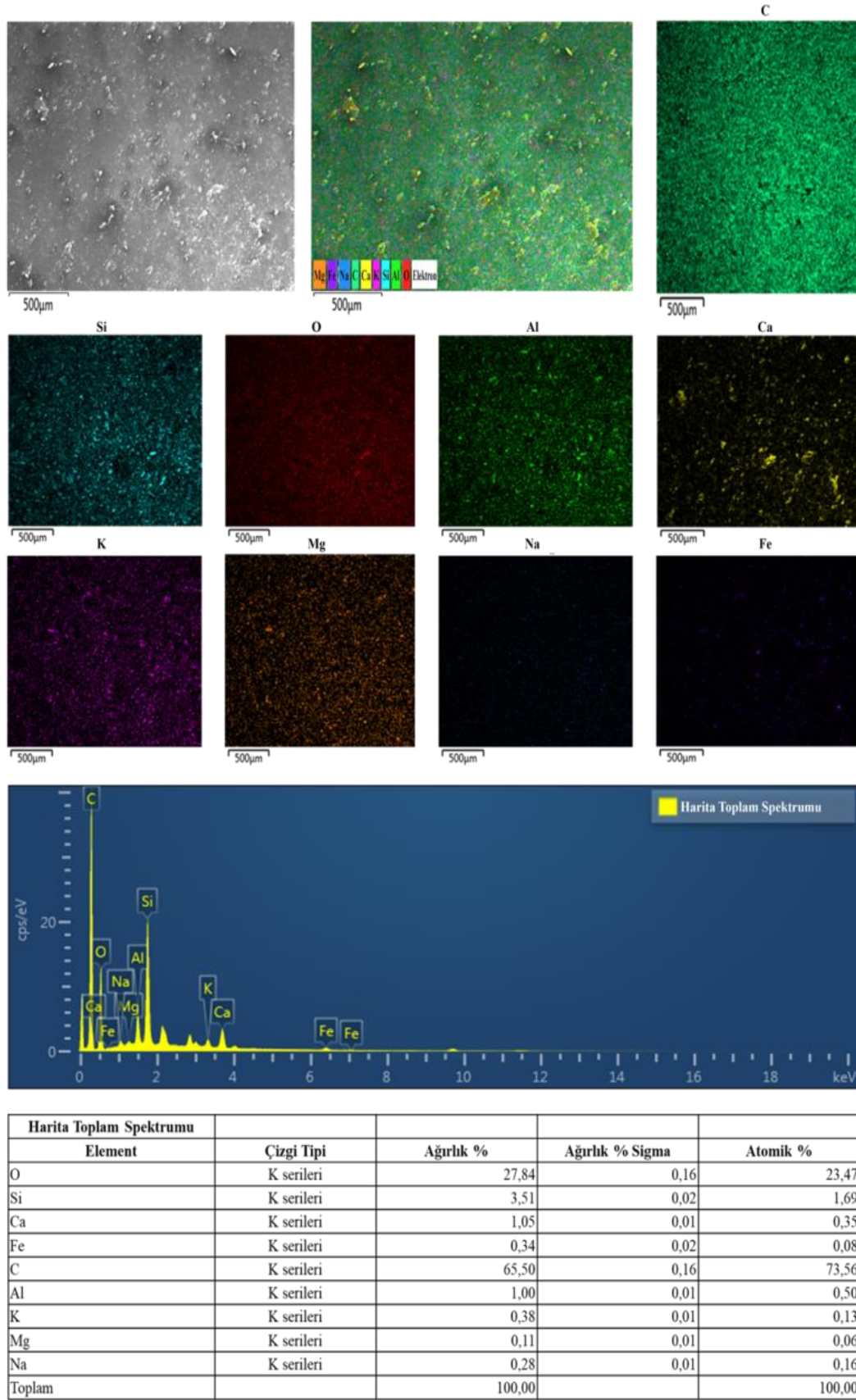
PR/STT-2 numunesine ait SEM-EDS analiz değerleri incelendiğinde, C elementinin %65,50 ve O elementinin %27,84 oranlarıyla diğer elementlerden daha yoğun olduğu görülmektedir. Ayrıca bu numunenin içerisinde eser miktarlarda

Si, Ca, Al, K, Fe, Na ve Mg gibi diğer elementler bulunmaktadır. PR/STT-2’nin, PR/STT-1’e göre daha fazla taş tozunun eklenmesi, matris içerisinde toz parçacıklarının bir araya gelerek kümelenmesine ve Sille taşındaki bazı bileşiklerin karbonatlaşması C ve O elementlerinin oranlarının azalmasına, diğer elementlerin ise artmasına neden olmaktadır. Ayrıca kompozit yüzeyinde görülen kümelenme, elementlerin kompozit içerisine homojen dağılımını engellemektedir (Şekil 8).

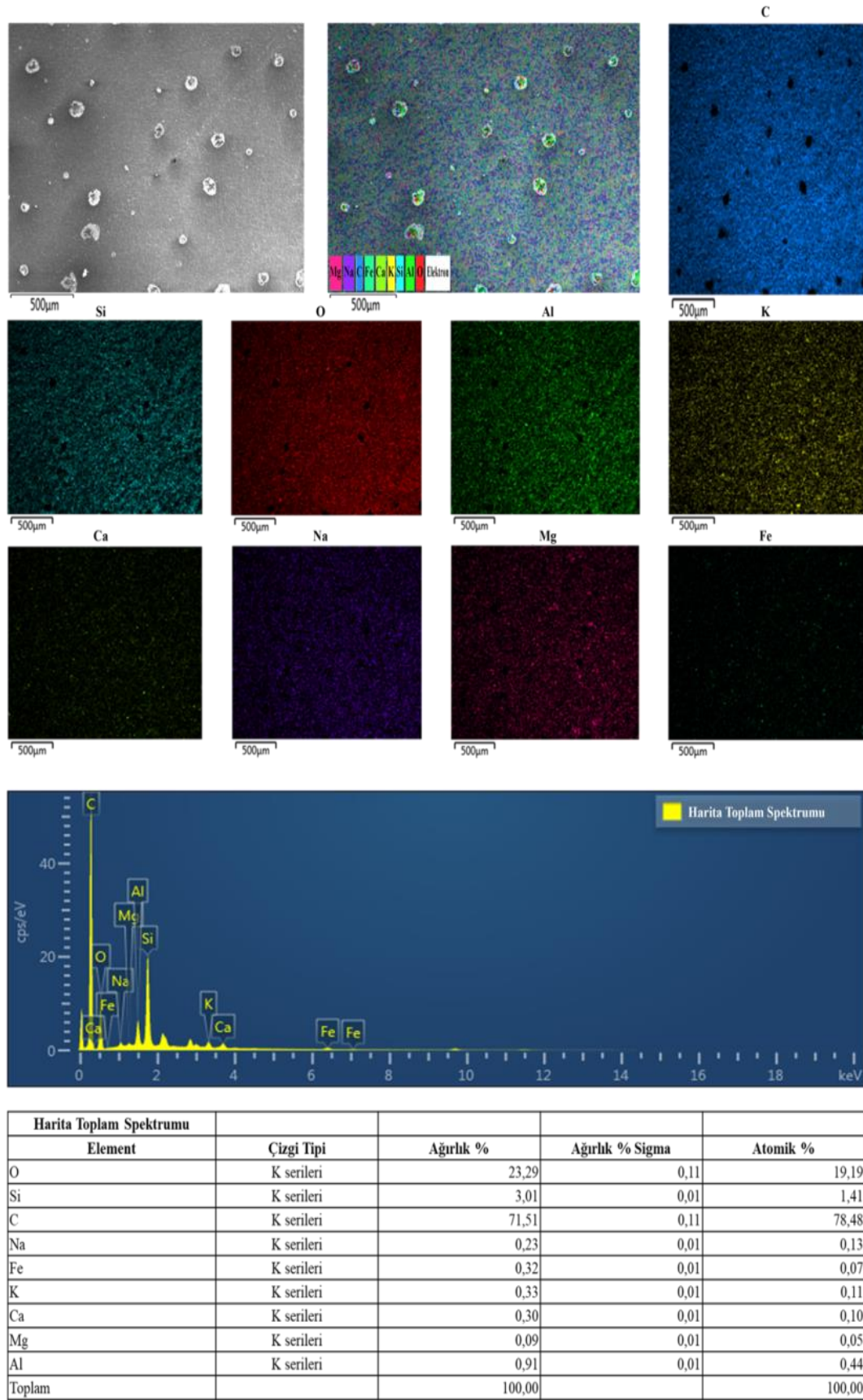
PR/STT-3 kompozit yüzeyinin 500 µm büyütme SEM görüntüsü ve EDS analiz değerleri Şekil 9’da verilmiştir. Bu numunenin diğer numuneler gibi, C (%71,51) ve O (%23,29) elementleri diğer elementlerden daha yoğun bulunmaktadır. Aynı numunede Si elementi %3 oranında bulunurken Ca, Al, K, Fe, Na ve Mg elementlerinin toplam içeriği %1’in altındadır. Ayrıca kompozitteki yüksek oranda taş tozu, matris içerisinde toz parçacıklarının bir araya gelerek kümelenmeleri sayısını arttırdığı görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 7. PR/STT-1 kompozitinin SEM görüntüsü ve EDS analizi  
 Figure 7. SEM image and EDS analysis of PR/SSP-1 composite



**Şekil 8.** PR/STT-2 kompozitinin SEM görüntüsü ve EDS analizi  
**Figure 8.** SEM image and EDS analysis of PR/STT-2 composite



**Şekil 9.** PR/STT-3 kompozitinin SEM görüntüsü ve EDS analizi  
**Figure 9.** SEM image and EDS analysis of PR/STT-3 composite

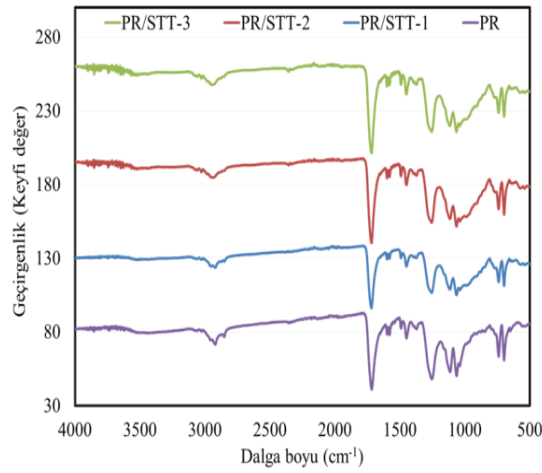
### 3.4. FTIR Bulguları

PR ve PR/STT kompozitlerinin FTIR analiz sonucu Tablo 6 ve Şekil 10'da verilmiştir. Tablo 6 ve Şekil 10'da verilen sonuçlara göre, PR ve PR/STT numunelerinin geçirgenlik değerinin azaldığı, pik değerleri dalga sayısı sırasıyla;  $\sim 3431 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 2920 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 2850 \text{ cm}^{-1}$ ,  $2349 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1717 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1598 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1448 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1370 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1254 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1113 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1063 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 980 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 850 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 740 \text{ cm}^{-1}$  ve  $\sim 696 \text{ cm}^{-1}$  şeklindedir. Tablo 6'daki sonuçlara göre,  $3431 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı O-H gerilme titreşimi ve  $2920 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı  $\text{CH}_2$ - $\text{CH}_3$  alifatik parçaların titreşim gerilmesini gösterirken,  $2850 \text{ cm}^{-1}$   $\text{CH}_2$  dairesel ve doğrusal parçaların titreşim gerilmesini ifade etmektedir.  $1717 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında C=O titreşim gerilmesi tespit edilirken,  $1598 \text{ cm}^{-1}$  C=C aromatik halka içinde titreşim gerilmesi ve  $1448 \text{ cm}^{-1}$  C-C aromatik halka içinde titreşim gerilmesi tespit edilmiştir.  $1370 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında

$\text{CH}_3$  simetrik bükme titreşimi,  $1254 \text{ cm}^{-1}$   $\text{C}_{\text{sp}^3}\text{-O}$  (ester bağı),  $1113 \text{ cm}^{-1}$   $\text{C}_{\text{sp}^3}\text{-O}$  (alkol bağı) ve  $1063 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında ise C-H düzleminde titreşimler bulunmaktadır.  $980 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında C=C doymamış polyesterin çift bağı,  $850 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında C-H deformasyon titreşimi düzlemden 1 veya 2 benzen halkası,  $740 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında C-H deformasyon titreşimi düzlemden 3 veya 4 benzen halkası ve  $696 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında C-H deformasyon titreşimi düzlemden 5 benzen halkasını ifade etmektedir (Asimakopoulos vd., 2014). PR/STT numunelerinde PR örneklerinden farklı olarak  $\sim 2349 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında tepe değeri ortaya çıkmıştır. Kompozitlerde oluşan bu tepe değeri, C=C konjuge ve C $\equiv$ C olduğunu göstermektedir (Mecozzi vd., 2012). Ayrıca  $\sim 2349 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyundaki tepe değerinin ortaya çıkmasında, PR ve STT arasındaki güçlü C=C ve C $\equiv$ C bağlarını göstermektedir.

**Tablo 6.** PR ve PR/STT kompozitlerinin dalga sayılarına göre atomlar arasında oluşan bağ türü  
**Table 6.** Type of bond formed between atoms according to wave numbers of PR and PR/SSP composites

| PR ve PR/STT<br>Kompozitlerinin<br>Dalga Sayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Atomlar Arasında Oluşan Bağ Türü                                      |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 3431                                                                 | O-H Gerilme Titreşimi                                                 |
| 2920                                                                 | $\text{CH}_2$ , $-\text{CH}_3$ Alifatik Parçaların Titreşim Gerilmesi |
| 2850                                                                 | $\text{CH}_2$ Dairesel ve Doğrusal Parçaların Titreşim Gerilmesi      |
| 2349                                                                 | C=C Konjuge ve C $\equiv$ C                                           |
| 1717                                                                 | C=O Titreşim Gerilmesi                                                |
| 1598                                                                 | C=C Aromatik Halka İçinde Titreşim Gerilmesi                          |
| 1448                                                                 | C-C Aromatik Halka İçinde Titreşim Gerilmesi                          |
| 1370                                                                 | $\text{CH}_3$ Simetrik Bükme Titreşimi                                |
| 1254                                                                 | $\text{C}_{\text{sp}^3}\text{-O}$ (ester bağı)                        |
| 1113                                                                 | $\text{C}_{\text{sp}^3}\text{-O}$ (alkol bağı)                        |
| 1063                                                                 | C-H Düzlemindeki Titreşimler                                          |
| 980                                                                  | C=C Doymamış Polyesterin Çift Bağı                                    |
| 850                                                                  | C-H Deformasyon Titreşimi Düzlemden 1 veya 2 Benzen Halkası           |
| 740                                                                  | C-H Deformasyon Titreşimi Düzlemden 3 veya 4 Benzen Halkası           |
| 696                                                                  | C-H Deformasyon Titreşimi Düzlemden 5 Benzen Halkası                  |



**Şekil 10.** PR ve PR/STT kompozitlerinin FTIR analizi

*Figure 10. FTIR analysis of PR and PR/SSP composites*

### 3.5. Basınç Dayanım Testi Bulguları

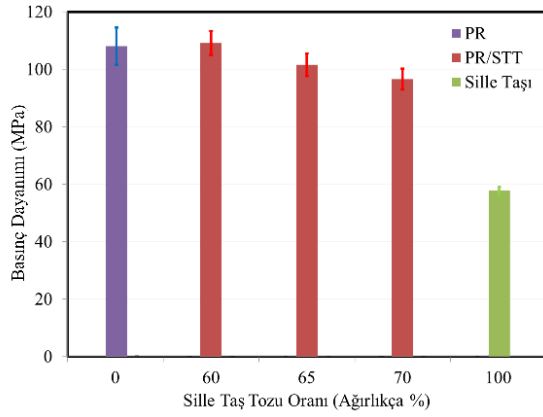
Tablo 7 ve Şekil 11'deki verilere göre, PR/STT kompozitlerinin basınç dayanımı 96,57 ile 109,16 MPa arasında değişmektedir. Tablo 7 ve Şekil 11'deki sonuçlara göre, %60 STT oranına sahip kompozitin en yüksek dayanıma sahip olduğu belirlenmiş, basınç dayanımı saf PR'ye göre artmıştır. Ancak STT miktarı ağırlıkça %60'tan %70'e çıkarıldığında kompozitin basınç dayanım değeri hem PR/STT-1 hem de saf PR'ye göre azalmış, STT'nin artırılmasına bağlı olarak taş tozu ile matrisin yapışma bağlantısının azalmasına yol açmıştır. Çift kovalent bağ, tek kovalent bağdan daha büyük bir elektrostatik çekim ve daha büyük bir mukavemet sağladığından kompozitin

basınç dayanımını arttırmaktadır (Ari ve Oral, 2025). Dolayısıyla kompozitlerdeki bağların sayısı ve kuvveti, mekanik özelliklerindeki değişimini açıklamaktadır (Şekil 10). Sille taşının basınç dayanımı 57,86 MPa olarak tespit edilmiştir. PR/STT kompozitlerinin basınç dayanımı Sille taşının basınç dayanımına göre, %66,90'dan %88,66'a kadar artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Saf PR'nin basınç dayanımı, Sille taşının basınç dayanımına göre %86,76 kadar artış olduğu belirlenmiştir (Tablo 7 ve Şekil 11). Bu sonuca benzer sonuçlar literatürdeki polimer katkı onarım harçlarının, basınç dayanımlarında da görülmektedir (Aggelakopoulou vd., 2011; Alves vd., 2020; Apostolopoulou vd., 2021; Rahman ve Islam, 2012). Örneğin Alves vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, steatit taş tozuna polimer matris eklenmesinin kompozitlerin mukavemetini artırdığı ve çatlakların yayılmasını geciktirdiği belirlenmiştir. Aynı çalışmada polimer matris ile steatit taş tozları arasında iyi bir arayüz koşulunun sağlanmasının, tarihi yapıların restorasyonu açısından yüksek bir potansiyele sahip olduğu ifade edilmiştir. Rahman ve Islam (2012) tarafından yapılan araştırmada, onarım harçlarının mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde polimer malzemelerin eklenmesi, basınç dayanımının artmasına katkı sağladığı belirtilmiştir.

**Tablo 7.** PR, PR/STT kompozitlerinin ve Sille taşının basınç dayanımları

*Table 7. Compressive strengths of PR, PR/SSP composites and Sille stone*

| Numunelerin No | PR/STT Karışımlarının Oranı<br>(Ağırlıkça % Oranı) | PR/STT ve Sille Taşının Basınç<br>Dayanımları (MPa) |
|----------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| PR             | 100:0                                              | 108,06±6,51                                         |
| PR/STT-1       | 40:60                                              | 109,16±4,07                                         |
| PR/STT-2       | 35:65                                              | 101,60±3,91                                         |
| PR/STT-3       | 30:70                                              | 96,57±3,72                                          |
| Sille Taşı     | 0:100                                              | 57,86±1,32                                          |



**Şekil 11.** PR, PR/STT kompozitlerinin ve Sille taşının basınç dayanımları

*Figure 11. Compressive strengths of PR, PR/STT composites and Sille stone*

### 3.6. Üç Noktalı Eğilme Dayanım Testi Bulguları

Tablo 8 ve Şekil 12'deki verilere göre, PR/STT kompozitlerinin üç noktalı eğilme dayanımları 49,25 ile 49,29 MPa arasında değişmektedir. PR/STT numuneleri arasından STT miktarı ağırlıkça %60 oranına sahip kompozitin en yüksek dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum belirli oranda taş tozu ilavesinin,

kompozitin rijitliğini artırarak eğilme yüklerine karşı direncinin olumlu etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Ancak STT miktarı ağırlıkça %60'tan %70'e çıkarıldığında kompozitin dayanımı PR/STT-1 numunesine göre azalmıştır. STT'nin oranının arttırılmasına bağlı olarak polyester matrisin yapışma kuvvetini azaltmaktadır. PR/STT kompozitlerinde STT oranının artmasıyla, PR'nin tüm partiküller arasına nüfuz edilememesine ve polyester matris ile taş tozunun etkileşiminin azalmasına yol açmaktadır (Tablo 8 ve Şekil 12). Bu sonuca benzer sonuçlar literatürdeki polimer katkılı onarım harçlarının, üç noktalı eğilme dayanımlarında da görülmektedir (Amenta vd., 2017; Apostolopoulou vd., 2021; Gour vd., 2018; Lanis ve Alvarez-Galindo, 2003). Örneğin Gour vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, harca eklenen polimer katkı malzemelerinin, büzülme çatlaklarını azaltmasına ve eğilme dayanımlarını arttırmasına katkı sağladığı belirlenmiştir (Gour vd., 2018).

**Tablo 8.** PR/STT kompozitlerinin üç noktalı eğilme dayanımları

*Table 8. Three point bending strength of PR/STT composites*

| Numunelerin No | PR/STT Karışımlarının Oranı<br>(Ağırlıkça % Oranı) | PR/STT Üç Noktalı Eğilme Dayanımları (MPa) |
|----------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| PR/STT-1       | 40:60                                              | 49,29±1,01                                 |
| PR/STT-2       | 35:65                                              | 49,27±2,15                                 |
| PR/STT-3       | 30:70                                              | 49,25±1,32                                 |

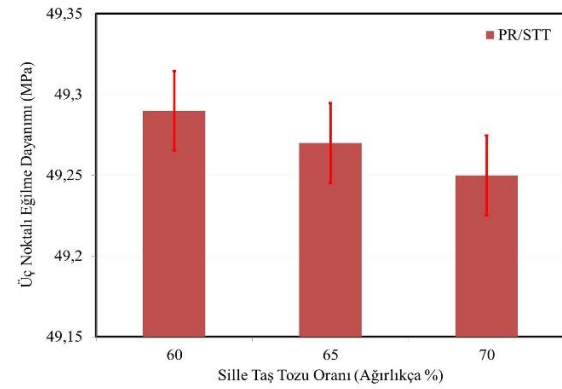
### 3.7. Çekme Dayanım Testi Bulguları

Tablo 9 ve Şekil 13'teki verilere göre, PR/STT kompozitlerinin çekme dayanımları 56,11 ile 56,27 MPa arasında değişmektedir. STT oranı arttıkça çekme dayanımında sınırlı bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. PR/STT kompozitleri arasında en yüksek çekme dayanımının PR/STT-1 numunesine ait olduğu belirlenmiştir. Uygun bağlayıcı/dolgu

oranı, fazlar arası etkileşimi güçlendirerek çekme dayanımında artışa katkı sağlamaktadır. Ancak STT miktarı ağırlıkça % 60'dan % 70'e çıkarıldığında kompozitin dayanımı, PR/STT-1 numunesinin çekme dayanımına göre düşüş göstermiştir (Tablo 9 ve Şekil 13). Literatürdeki bazı çalışmalarda, restorasyonda kullanılan polimer katkılı onarım harçlarının çekme dayanımlarının

incelendiği görülmektedir (Bhutta, 2010; Hassan vd., 2000; Mallat ve Alliche, 2011; Maravelaki-Kalaitzaki vd., 2013). Örneğin Bhutta (2010) tarafından yapılan araştırmada, dolgu parçacıkları arasındaki tüm boşlukları dolduracak yeterli matrisin olması, matris/dolgu etkileşiminin artmasını ve kompozit harçlarının da çekme dayanımlarının artmasını sağladığı belirlenmiştir. Hassan vd. (2000) tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise, polimer katkılı harçlarda uygun oranda bağlayıcı ve dolgunun eklenmesinin gözenek yapısını iyileştirdiği ve düşük büzülme özellikleriyle geleneksel harçlara

göre daha iyi çekme dayanımları olduğu tespit edilmiştir.



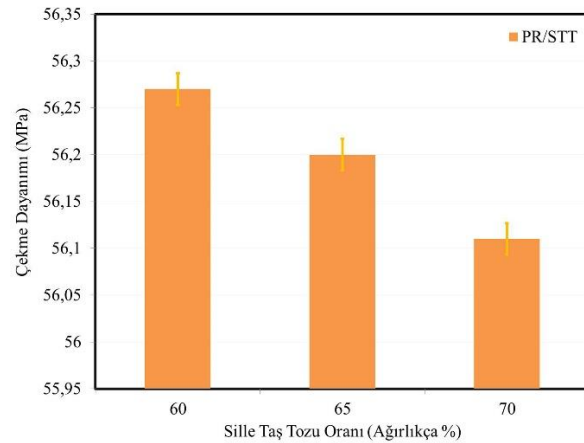
**Şekil 12.** PR/STT kompozitlerinin üç noktalı eğilme dayanımlarındaki değişim

**Figure 12.** Variation in three-point bending strength of PR/STT composites.

**Tablo 9.** PR/STT kompozitlerinin çekme dayanımları

**Table 9.** Values of tensile strength of PR/STT composites

| Numunelerin No | PR/STT Karışımlarının Oranı<br>(Ağırlıkça % Oranı) | PR/STT Çekme Dayanımları (MPa) |
|----------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| PR/STT-1       | 40:60                                              | 56,27±1,32                     |
| PR/STT-2       | 35:65                                              | 56,20±1,28                     |
| PR/STT-3       | 30:70                                              | 56,11±1,19                     |



**Şekil 13.** PR/STT kompozitlerinin çekme dayanımlarındaki değişim

**Figure 13.** Variation in tensile strength of PR/STT composites

### 3.8. Sertlik Testi Bulguları

Tablo 10 ve Şekil 14'te verilen sonuçlara göre, PR/STT kompozitlerinde taş tozu

miktarının artışı, belli bir orana kadar (STT %60–%65) kompozitin sertlik değerinin azalmasına yol açmıştır. PR/STT numunelerinde STT miktarı ağırlıkça %60'tan %65'e çıkarıldığında, malzemede gerçekleşen topaklaşma, kompozitin sertlik ve dayanımlarının düşmesine neden olmuş; PR/STT-2'nin sertliği azalmıştır (Şekil 8 ve Şekil 14). Bu kompozit boşluk tayini sonuçlarında gösterildiği gibi, boşluk oranlarının diğer numunelerden yüksek olması nedeniyle, PR/STT-2'nin sertliğinin azalmasına yol açmıştır (Tablo 2 ve Tablo 10). Ancak STT miktarı ağırlıkça %65'den %70'e çıkarıldığında, sertlik değerinde değişim olmamıştır. Bu durum taş tozu miktarının artışının belli bir orandan sonra etkisiz kaldığını göstermektedir. PR/STT numunelerinde sertlik değeri sonuçları;

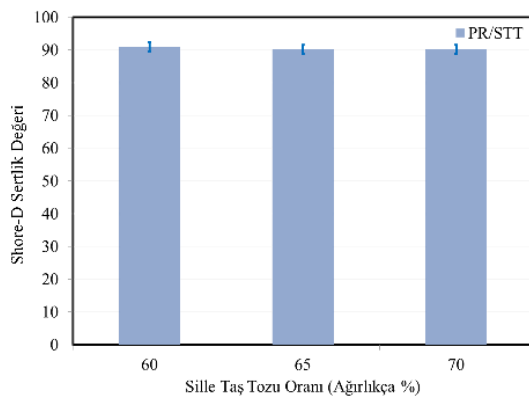
basınç dayanım, üç noktalı eğilme dayanım ve çekme dayanım testi sonuçlarıyla karşılaştırıldığında benzer sonuçları

vermiştir (Tablo 7–Tablo 10, Şekil 11–Şekil 14).

**Tablo 10.** PR/STT kompozitlerinin Shore-D sertlik değerleri

**Table 10.** Shore-D hardness values of PR/SSP composites

| Numunelerin No | PR/STT Karışımlarının Oranı<br>(Ağırlıkça % Oranı) | PR/STT Shore-D Sertlik Değeri |
|----------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|
| PR/STT-1       | 40:60                                              | 91,0±1,7                      |
| PR/STT-2       | 35:65                                              | 90,2±1,2                      |
| PR/STT-3       | 30:70                                              | 90,2±1,2                      |



**Şekil 14.** PR/STT kompozitlerinin Shore-D sertlik test değerlerinin değişimi

**Figure 14.** Variation of Shore-D hardness test values of PR/SSP composites

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışma ile Sille taşıyla inşa edilen tarihi yapıların restorasyonunda kullanılmak üzere, onarım harçlarının geliştirilmesi ve özelliklerinin belirlenmesine odaklanılmıştır. STT içerisine PR matrisleri farklı oranlarda ilave edilerek kompozit harçlar elde edilmiştir. Elde edilen PR/STT'nin; fiziksel, mikroyapı ve mekanik özellikleri tespit edilmiştir. PR/STT numunelerinin mikroyapı özellikleri SEM ve FTIR kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında deneysel veriler neticesinde elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Boşluk tayini ve su emme test sonuçlarına göre, polyester matrisli kompozit

harçlarının, Sille taşına göre daha düşük su emme oranına ve boşluk yüzdesine sahip olduğu belirlenmiştir. Malzemenin su emme ve boşluk yüzdesinin düşük olması, su emme kaynaklı korozyon, rutubet ve çürüme hasarlarının azalmasına yardımcı olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

- Kompozit harçlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yapılan test sonuçlarına göre, polyester matrisli numunelerde en yüksek basınç dayanımı veren karışım oranının % 40 matris ve % 60 taş tozu olduğu tespit edilmiştir.
- Basınç testi sonucuna göre, polyester matrisli kompozit harçlarının dayanımının, Sille taşına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- PR/STT numunelerinde STT miktarının artırılmasına bağlı olarak malzemenin basınç dayanımının azaldığı belirlenmiştir.
- PR/STT'nin SEM-EDS görüntülerinde STT miktarının artırılması, malzemede pürüzlü yüzeyleri ve boşlukları oluşturmaktadır. Kompozitlerdeki taş tozunun artırılması, polyester matris ile taş tozu arasındaki bağ kuvveti ve homojen dağılımında etkili olmuştur.

Sonuç olarak, kompozit harçlarının karışımında, mekanik ve fiziksel özellikleri açısından en uygun bileşimin %40 polyester

matris ve %60 taş tozu olduğundan tarihi yapılarda, onarım harcı uygulamasında bu oranların kullanılması gerektiği önerilmektedir. Bu karışım oranıyla hazırlanan kompozit harç; taş kesim atıklarının azaltılmasına ve restorasyonda ekonomik katma ürünlere dönüştürülmesinde diğer karışım oranlarına göre daha fazla yarar sağlamaktadır. Polyester matrisli kompozitin iyi bir mukavemeti ve düşük su emme oranları sayesinde, Sille taşıyla inşa edilen tarihi yapıların çürümüş kısımlarının restorasyonunda harç uygulaması için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu çalışmada geliştirilen kompozit harç, taş öğelerinin yüzeysel kayıp olan bölgelerini ve küçük çatlakları onararak, tarihi yapıların korunmasına katkı sağlayacaktır. Bu kompozit harcın Konya'daki tarihi yapıların su ve neme bağlı çiçeklenme, rutubet gibi nedenlerden dolayı meydana gelen hasarları önemli ölçüde azaltacaktır. Bu çalışmada polyester matrisli kompozitler üretilmiş olsa da, gelecekteki araştırmalarda farklı polimer matrisler ve farklı oranlarda STT'nin karışımı yapılarak, kompozit harçlarına yeni özellikler kazandırılarak, restorasyon çalışmalarında kullanımı sağlanabilir. Bu çalışmada, üretilen kompozit harçlarının ve Sille taşının renk ölçümü yapılmadığından malzemeler arasında renk uyumu tartışılmamıştır. Ancak gelecekteki çalışmalarda, polyester matrisli kompozit harçlarının Sille taşıyla renk uyumunu sağlayıp sağlamadığının belirlenmesi için malzemelerin renk ölçümlerini ve ultraviyole ışınlarla dayanıklılığının belirlenmesi önerilebilir.

#### **Yazar katkısı (Author contribution)**

Arı, A.C: Fikir ve kavram, Finansal kaynak

araştırması, Malzeme tedarik, Literatür taraması, Yazım. Tosun, M: Denetleme ve Danışma, Eleştirel inceleme.

#### **Teşekkür**

Bu çalışma Ahmet Cihat ARI tarafından Mustafa TOSUN danışmanlığında Mart 2023'de tamamlanan “Tarihi Yapıların Onarımına Yönelik Doğal Taş Tozu İle Polimer Bağlayıcı Harçların Üretimi ve Karakterizasyonu; Sille Taşı Örneği” başlıklı doktora tezinden yararlanılarak hazırlanmıştır. Yazarlar Konya Teknik Üniversitesi tarafından sağlanan desteğe teşekkür ederler. Çalışmada analizler Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM) laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. BİTAM çalışanlarına yardımlarından dolayı teşekkür ederiz.

#### **Finansman beyanı**

Bu çalışma Doktora kapsamında Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje (BAP) komisyonu tarafından (Proje no: 211120045) desteklenmiştir.

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

#### **Etik standartlar**

Bu çalışma için Etik Kurul Kararı gerekmemektedir.

#### **Kaynaklar**

Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., Moropoulou, A. (2011). Properties of lime–metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science*, 53(1), 15-19.

<https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.005>

5

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.06.001>
- Alpsalaz, F. (2025). fault detection in power transmission lines: Comparison of chirp-z algorithm and machine learning based prediction models. *Eksploracja i Niezawodność Maintenance and Reliability*, 27(4), 1-15. <http://doi.org/10.17531/ein/203949>
- Alpsalaz, F., Özüpak, Y., Aslan, E., Uzel, H. (2025). Classification of maize leaf diseases with deep learning: Performance evaluation of the proposed model and use of explicable artificial intelligence. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 105412. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2025.105412>
- Amenta, M., Karatasios, I., Maravelaki-Kalaitzaki, P., Kilikoglou, V. (2017). The role of aggregate characteristics on the performance optimization of high hydraulicity restoration mortars. *Construction and Building Materials*, 153, 527-534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.134>
- Apostolopoulou, M., Bakolas, A., Kotsainas, M. (2021). Mechanical and physical performance of natural hydraulic lime mortars. *Construction and Building Materials*, 290, 123272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123272>
- Arandigoyen, M., Alvarez, J. (2007). Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 767-775. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.023>
- Arı, A.C. (2025). İgnimbirit taş atıklarının değerlendirilmesine yönelik epoksi matrisli kompozitlerin mekanik ve hidrofobik özelliklerinin incelenmesi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 8(1), 41-53. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1552654>
- Arı, A.C., and Oral, I. (2025). Ultrasonic characterization of the mechanical properties of polyester resin/ignimbrite stone powder composite mortars. *Polymer Composites*, 1-20. <https://doi.org/10.1002/pc.29977>
- Arı, A.C., Tosun, M., Oral, İ., Eker, Y.R. (2024). Ultrasonic characterization of polymer based sille stone powder composite mortars. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 35(3), 21-46. <https://doi.org/10.18400/tjce.1297882>
- Asimakopoulos, I., Psarras, G., Zoumpoulakis, L. (2014). Barium titanate/polyester resin nanocomposites: Development, structure-properties relationship and energy storage capability. *Express Polymer Letters*, 8(9), 692-707. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2014.72>
- ASTM-D570, (2005). Standard test method for water absorption of plastics. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM-D638, (2005). Standard test method for tensile properties of plastic. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM-D695, (2010). Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM-D790, (2000). Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM-D2240, (2010). Standard test method for rubber property-durometer hardness. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM-D2734, (2009). Standard test method for void content of reinforced plastics. American Society for Testing and Materials, USA.

- Bakshi, P., Pappu, A., Patidar, R., Gupta, M.K., Thakur, V. K. (2020). Transforming marble waste into high-performance, water-resistant, and thermally insulative hybrid polymer composites for environmental sustainability. *Polymers*, 12(8), 1781. <https://doi.org/10.3390/polym12081781>
- Bhutta, M.A.R. (2010). Effects of polymer–cement ratio and accelerated curing on flexural behavior of hardener-free epoxy-modified mortar panels. *Materials and Structures*, 43, 429-439. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9578-8>
- Curulli, A., Montesperelli, G., Ronca, S., Cavalagli, N., Ubertini, F., Padeletti, G., Vecchio Cipriotti, S. (2020). A multidisciplinary approach to the mortars characterization from the Town Walls of Gubbio (Perugia, Italy). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142(5), 1721-1737. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09937-9>
- Demir, M., Yön, M.Ş., Karataş, M. (2025). Evaluation of the potential use of Nevşehir stone powder as a portland cement substitute in self-compacting mortars. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 16(1), 229-234. <https://doi.org/10.24012/dumf.1581298>
- Demirdag, S. (2013). Effects of freezing–thawing and thermal shock cycles on physical and mechanical properties of filled and unfilled travertines. *Construction and Building Materials*, 47, 1395-1401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.045>
- Di Bella, G., Fiore, V., Galtieri, G., Borsellino, C., Valenza, A. (2014). Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene). *Construction and Building Materials*, 58, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.026>
- Doan, T.T.L., Brodowsky, H.M., Gohs, U., Mäder, E. (2018). Re-use of marble stone powders in producing unsaturated polyester composites. *Advanced Engineering Materials*, 20(7), 1701061. <https://doi.org/10.1002/adem.201701061>
- Eren, Y. (1993). Stratigraphy of autochthonous and cover units of the Bozdağlar massif NW Konya. *Geological Bulletin of Turkey*, 36, 7-23.
- Faria, P., Henriques, F., Rato, V. (2008). Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 9(3), 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2008.03.003>
- Fener, M., İnce, İ. (2015). Effects of the freeze–thaw (F–T) cycle on the andesitic rocks (Sille-Konya/Turkey) used in construction building. *Journal of African Earth Sciences*, 109, 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.05.006>
- Gour, K.A., Ramadoss, R., Selvaraj, T. (2018). Revamping the traditional air lime mortar using the natural polymer–Areca nut for restoration application. *Construction and Building Materials*, 164, 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.056>
- Gupta, L.K., Vyas, A.K. (2018). Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. *Construction and Building Materials*, 191, 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.203>
- Haach, V.G., Vasconcelos, G., Lourenço, P.B. (2011). Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2980-2987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011>
- Hassan, K., Robery, P., Al-Alawi, L. (2000). Effect of hot-dry curing environment on the intrinsic properties of repair materials.

- Cement and Concrete Composites*, 22(6), 453-458. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00048-2)
- Hatir, M.E., Barstuğan, M., Ince, I. (2020). Deep learning-based weathering type recognition in historical stone monuments. *Journal of Cultural Heritage*, 45, 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.04.008>
- Jain, A., Gupta, R., Chaudhary, S. (2019). Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 221, 539-552. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.104>
- Klisińska-Kopacz, A., Tišlova, R., Adamski, G., Kozłowski, R. (2010). Pore structure of historic and repair Roman cement mortars to establish their compatibility. *Journal of Cultural Heritage*, 11(4), 404-410. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.03.002>
- Korat, L., Mirtič, B., Mladenović, A., Pranjić, A. M., Kramar, S. (2015). Formulation and microstructural evaluation of tuff repair mortar. *Journal of Cultural Heritage*, 16(5), 705-711. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.11.002>
- Lanas, J., Alvarez-Galindo, J. I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1867-1876. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2)
- Mallat, A., Alliche, A. (2011). Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1587-1595. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.017>
- Maravelaki-Kalaitzaki, P., Agioutantis, Z., Lionakis, E., Stavroulaki, M., Perdikatsis, V. (2013). Physico-chemical and mechanical characterization of hydraulic mortars containing nano-titania for restoration applications. *Cement and Concrete Composites*, 36, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.002>
- Martinez-Garcia, C., Gonzalez-Fonteboa, B., Carro-Lopez, D., Martinez-Abella, F. (2020). Effects of mussel shell aggregates on hygric behaviour of air lime mortar at different ages. *Construction and Building Materials*, 252, 119113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119113>
- Morgül, Ö.K. (2015). Mühendislikte Deneysel Metotlar Ders Notu, 3 Nokta Eğme Deneyi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.
- Mecozzi, M., Pietroletti, M., Scarpiniti, M., Acquistucci, R., Conti, M. E. (2012). Monitoring of marine mucilage formation in Italian seas investigated by infrared spectroscopy and independent component analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 6025-6036. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2400-4>
- Pozo-Antonio, J. (2015). Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Construction and Building Materials*, 77, 472-478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115>
- Rahman, M.M., Islam, M.A. (2012). Effect of epoxy resin on the intrinsic properties of masonry mortars. *Iranian Polymer Journal*, 21, 621-629. <https://doi.org/10.1007/s13726-012-0065-7>
- Roig-Salom, J.-L., Doménech-Carbó, M.-T., de la Cruz-Cañizares, J., Bolívar-Galiano, F., Pelufo-Carbonell, M.-J., Peraza-Zurita, Y. (2003). SEM/EDX and vis spectrophotometry study of the stability of resin-bound mortars used for casting replicas and filling missing parts of historic stone fountains. *Analytical and*

- Bioanalytical Chemistry*, 375, 1176-1181.  
<https://doi.org/10.1007/s00216-003-1826-0>
- Sanchez, E., Zavaglia, C., Felisberti, M. (2000). Unsaturated polyester resins: influence of the styrene concentration on the miscibility and mechanical properties. *Polymer*, 41(2), 765-769.  
[https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00184-6)
- Soufi, A., Mahieux, P.-Y., Aït-Mokhtar, A., Amiri, O. (2016). Influence of polymer proportion on transfer properties of repair mortars having equivalent water porosity. *Materials and Structures*, 49, 383-398.  
<https://doi.org/10.1617/s11527-014-0504-3>
- Török, Á., Szemerey-Kiss, B. (2019). Freeze-thaw durability of repair mortars and porous limestone: compatibility issues. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6, 42. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0282-1>
- URL-1, (2023).  
<https://www.erbakan.edu.tr/bitam/sayfa/3297>, 29 Mart.2023.
- URL-2, (2023).  
<https://www.erbakan.edu.tr/bitam/sayfa/3286>, 29 Mart.2023.
- URL-3, (2023).  
<https://www.erbakan.edu.tr/bitam/sayfa/7666>, 29 Mart.2023.
- URL-4, (2023).  
[http://www.baskent.edu.tr/~ekoc/course/s/MAK402/MAK\\_402\\_DENEY\\_3.pdf](http://www.baskent.edu.tr/~ekoc/course/s/MAK402/MAK_402_DENEY_3.pdf), 29 Mart.2023.
- URL-5, (2023).  
<https://makelektronik.com.tr/bbk/9/Cekme-Testi-Nas%C4%B1l-Yap%C4%B1l%C4%B1r.html>, 29 Mart.2023.
- URL-6, (2023).  
<https://www.teknikurunler.com/shore-sertligi-nedir/#:~:text=sertli%C4%9Fini%20%C3%B6l%C3%A7mek%20i%C3%A7in%20kullan%C4%B1lan%20terimdir,mal>
- zemenin%20sertli%C4%9Fi%20o%20kadar%20y%C3%BCksektir, 29 Mart.2023.
- Vijayalakshmi, M., Sekar, A. S. S. (2013). Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*, 46, 1-7.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.018>
- Yurt, Ü., Çelikten, S., Atabey, İ. İ. (2024). Post-fire residual mechanical and microstructural properties of waste basalt and glass powder-based geopolymer mortars. *Journal of Building Engineering*, 94, 109941.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109941>
- Zedef, V., Kocak, K., Doyen, A., Ozsen, H., Kecec, B. (2007). Effect of salt crystallization on stones of historical buildings and monuments, Konya, Central Turkey. *Building and Environment*, 42(3), 1453-1457.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.010>
- Zheng, Z., Li, Y., Ma, X., Zhu, X., Li, S. (2019). High density and high strength cement-based mortar by modification with epoxy resin emulsion. *Construction and Building Materials*, 197, 319-330.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.167>