

Araştırma/Derleme Makalesi


# TARİHİ KİREÇ HARÇLARI VE KARAKTERİZASYONU ÇALIŞMALARI ÜZERİNE İNCELEMELER

**Ufuk SOYSAL<sup>†</sup>, Dilek Dilhan ALTINIŞIK<sup>††</sup>**

<sup>†</sup> T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, İzmir Restorasyon ve Konservasyon Bölge Laboratuvarı Müdürlüğü, İzmir, Türkiye

<sup>††</sup> Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İstanbul, Türkiye

**ufuksysl@gmail.com, dilek.dilhan@msgsu.edu.tr**

 0009-0003-8740-1295, 0009-0006-5553-0932

**Atıf/Citation:** SOYSAL, U., ALTINIŞIK, D.D., (2024). Tarihi Kireç Harçları ve Karakterizasyonu Çalışmaları Üzerine İncelemeler, Journal of Technology and Applied Sciences 7(2) s.97-115, DOI: 10.56809/icujtas.1465650

## ÖZET

Bu çalışma, tarihi yapıların inşasında önemli bir yeri olan kireç harçlarının ve bileşenlerinin (bağlayıcı, agrega ve katkı maddeleri) kısa tanımlarının yapıldığı ve koruma ve onarım projeleri adına gerçekleştirilen kireç harçlarının karakterizasyonu çalışmalarının bir özetini içermektedir. Bu sürecin ortaya konma sebebi, tarihi yapıların korunması ve onarımı ile ilgilenen koruma uzmanlarına, kireç harçlarının ilk üretim aşamasından restorasyon uygulamalarında kullanılacak onarım harcı üretim aşamasına kadar olan sürece dair farkındalık oluşturmak ve koruma laboratuvarları ile iletişimlerini sağlıklı bir biçimde yürütebilmelerine katkı sağlamaktır. Bu anlamda kireç harçlarının ve bileşenlerinin kısa tanımlarının yapıldığı çalışmada, kireç bağlayıcılar, agrega tipleri ve katkı maddeleri ile üretim teknolojileri hakkında çeşitli bilimsel yayınlardan faydalanılarak bir özet oluşturulmuş, bu özeti sonunda tarihi kireç harçlarının özelliklerinin belirlenmesi adına malzeme karakterizasyonu çalışmalarında kullanılan analiz yöntemleri ve çıkarılacak sonuçların değerlendirilmesine yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** kireç harcı, karakterizasyon, konservasyon, restorasyon, koruma laboratuvarı

Geliş/Received : 05.04.2024  
Gözden Geçirme/Revised : 09.05.2024  
Kabul/Accepted : 21.05.2024

# INVESTIGATIONS OF STUDIES ON HISTORICAL LIME MORTARS AND THEIR CHARACTERIZATIONS

## ABSTRACT

This study includes a brief description of lime mortars and their components (binders, aggregates and additives), which have an important role in the construction of historic buildings, and a summary of the characterization of lime mortars carried out for conservation and restoration projects. The reason for presenting this process is to raise awareness of conservation experts interested in the conservation and restoration of historic buildings about the process from the first production stage of lime mortars to the production stage of repair mortars to be used in restoration applications and to contribute to their communication with conservation laboratories in a healthy way. In this sense, the study provides a brief description of lime mortars and their components, a summary of lime binders, aggregate types and additives and production technologies by making use of various scientific publications, and at the end of this summary, the analysis methods used in material characterization studies to determine the properties of historical lime mortars and the evaluation of the results to be obtained are included.

**Keywords:** lime mortar, characterization, conservation, restoration, conservation laboratory

## 1. GİRİŞ

Kültürel mirasın korunması kavramı kapsamında, tarihi yapı ve kalıntılarının korunması ve onarımı üzerine bilimsel anlamda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapıların korunması sorunu ve bu soruna çözüm arayışı, zamanla korunması gerekli olanın yalnızca somut eserler değil daha karmaşık bir yapıya sahip, somut ve soyut bileşenlerin bir arada olduğu kültürel miras kavramının anlaşılması ile sonuçlanmıştır (Jokilehto, 1999).

Tarihi çevreyi oluşturan somut ve soyut her unsurun birbirine sıkıca bağlı olması, kültürel mirasın korunması bağlamındaki modern koruma yaklaşımlarının alanını daha da genişletmiştir (Ahunbay, 2014). Tekil yapı ölçeğinde başlayan ilk bilimsel koruma yaklaşımlarının tarihi çevreyi bütüncül şekliyle kapsayacak bir genişliğe ve oradan da somut ve soyut tüm unsurlarının korunması ilkesine ulaşması, koruma biliminin çok disiplinli bir yapıya sahip olmasının, çözülmesi kolay olmayan ve yeniden üretilmez bir kaynak olan kültürel miras için zorunlu olduğunu anlamamıza sebep olmuştur (Dinçer, 2013). Bu sebeple somut kültürel mirası oluşturan yapıların bir sonraki nesle aktarılabilmesinin yalnızca basit onarım ve yenileme faaliyetleri ile değil, geçmişten gelen geleneksel yapım teknikleri, inşaat teknolojileri ve dönemin sosyal ve ekonomik koşullarının anlaşılabilmesi gibi konularla da ilişkisi olduğu bilinmelidir (Uğurlu & Böke, 2009).

Korumanın basamakları olarak karşımıza çıkan, taşınır veya taşınmaz kültür varlıklarına yaklaşım modeli; belgeleme, teşhis, uygulama ve bakım olarak belirlenmiştir. Bu ana başlıklar muhakkak ki alt başlıklar ile çoğaltılabileceği gibi kültür varlıklarının korunması planı incelendiğinde birbirlerine ne kadar bağlı kaldıkları fark edilecektir. Bu bağlamda, yapıların mevcut durumunun analiz edilmesi, bu analiz kapsamında yapıya dair sorunların parçalara ayrılıp bir bütünü oluşturacak şekilde ortaya konması gereklidir. Koruma uygulamalarının genellikle karmaşık ve çok yönlü yapısı, bu planın düzenli bir halde sunulmasını gerektirir. Bu anlamda konservasyon raporu, bahsi geçen bu ana başlıkların her safhasında önemli bir yer tutmaktadır (Ersen ve ark., 2014).

Konservasyon raporunun amacı, toplanmış ve hazırlanmış belgeleme dokümanlarından da faydalanarak, yapıya dair mevcut durumu ve sorunları tespit etmek ve buna bağlı teşhisleri çözüme kavuşturmak adına öneriler sunmaktır. Dolayısıyla detaylı bir araştırma gerektiren bu bilimsel rapor, koruma biliminin çok disiplinli ve disiplinler arası yaklaşımına ihtiyaç duyar. Konservasyon raporunun, yapıya dair müdahalelere karar vermede ihtiyaç duyduğu teşhisleri ortaya koyan rapor ise malzemelerin analizleri ve bu analizlerin değerlendirilmesi ile ilgili incelemelerin yapıldığı bilimsel çalışmadır (Ersen ve ark., 2014). Geleneksel malzemelerin çeşitliliği de göz önüne alındığında, bunların incelenmesi ve bozulmalarının doğru teşhisi, koruma ve onarım uygulamalarının en doğru şekliyle ilerlemesine olanak sağlayacağından, bu analizler farklı uzmanlık alanlarının ortak çalışmaları ile ortaya konabilmektedir (Ersen & Güleç, 2009). Malzeme analizi raporlarında, yapı malzemeleri üzerinde yapılan deneyler temel alınarak yapının elemanları ve yapısı hakkında birçok bilgiye ulaşılabilmektedir. Bu bağlamda sıklıkla karşımıza çıkan malzemelerden biri kireç harçlarıdır. Kireç harçlarının üretim tekniklerinin ve çalışma prensiplerinin araştırılması ve anlaşılması, mevcut harçların karakterizasyonu, onarımlarda kullanılmak üzere ortaya konan kireç harcı terkipleri denemeleri gibi konular koruma biliminin ilgi odağındadır (Ersen & Verdön, 2010).

## 1. KİREÇ HARÇLARI

Bağlayıcı, agrega ve bazı zamanlar özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla katılan katkı maddelerinden oluşturulan, kompozit bir malzeme olan kireç esaslı (kireçli) harçların ilk olarak Mısır’da, MÖ 4000’li yıllarda sıva harcı olarak kullanıldığı bildirilmektedir (Sağın ve ark., 2021). Anadolu ve Filistin’de duvarları renklendirmek için sulandırılmış kireç (badana) şeklinde kullanıldığına dair veriler de mevcuttur (Torraca, 2009). Bir başka araştırma ise kirecin kullanımını MÖ 6000 yıllarına, Çayönü kazılarında bulunan “*terrazzo*” zeminlerin keşfine kadar götürerek, üretim teknolojisinin geçmişine dair daha geniş bir açı yaratmaktadır (Elsen, 2006). Harcın tanımını Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN), Avrupa Standartları (EN) kapsamında, geleneksel yöntemler ile, bir veya birden fazla (genellikle inorganik) bağlayıcı, agrega, katkı ve katkı maddelerinin bir araya getirilmesiyle, duvar işçiliğinde yataklama, birleştirme, yapıştırma ve duvar yüzeylerinde bitiş (sıva) için kullanılmak üzere oluşturulan ve zamanla sertleşerek son halini alan malzeme olarak tanımlar (EN 16572, 2015).

### 1.1. Kireç Bağlayıcı

Harçların üretim teknolojisi, harcın ortaya çıkarılması adına insan gücü ve enerji ihtiyacına karşılık gelmektedir. Kireç harcını oluşturan bağlayıcı ve agreganın üretiminde; agreganın üretimi genellikle insan gücüne dayalı iken, bağlayıcı olan kirecin üretim safhası yüksek miktarda bir ısı enerjisi de gerektirmektedir. Kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ihtiva eden kireç taşlarının kalsinasyonu (kızdırma), açığa çıkan kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) su ile hidrasyonu (söndürme) ve ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) karbondioksit ile reaksiyona girerek karbonatlaşmaya uğraması, kirecin üretimi ve harç içerisinde bağlayıcı olarak yeniden sertleşmesinin kısaca özetidir (Tablo 1).

**Tablo 1** Kirecin üretimi ve sertleşmesi süreci (Carran ve ark., 2012).

<b>KALSİNASYON</b>	$\text{CaCO}_3$ (Kireçtaşı) + Isı $\rightarrow$ $\text{CaO}$ (Sönmemiş Kireç) + $\text{CO}_2$
<b>HİDRATASYON</b>	$\text{CaO}$ (Sönmemiş Kireç) + $\text{H}_2\text{O}$ $\rightarrow$ $\text{Ca(OH)}_2$ (Sönmüş Kireç) + Isı
<b>KARBONATLAŞMA</b>	$\text{Ca(OH)}_2$ (Sönmüş Kireç) + $\text{CO}_2$ $\rightarrow$ $\text{CaCO}_3$ (Kireçtaşı)

Kirecin üretimi esnasında,  $\text{CaCO}_3$  içeren kireçtaşlarının  $900^\circ\text{C}$  ısıya maruz bırakılması (kalsinasyon) gerekir (Akman, 2003; Lechtman ve Hobbs, 1986). Bilimsel çalışmalar, kalsinasyon (kızdırma) işleminin MÖ 3000'li yıllardan beri bilindiğini, günümüzde Irak toprakları içerisinde yer alan Khafaje kazılarında keşfedilen verilerden ortaya koymaktadır (Dix, 1982). Kalsinasyon işlemi esnasında kireçtaşı ağırlığının yaklaşık %40 kadarını kaybeder. Vitruvius kalsinasyon işleminin bu aşamasını tarif ederken, taşların ısıtıldıktan sonra kütesinin değişmeyeceğini ancak ağırlıklarının üçte birine düşeceğini belirtir (Dürüşken, 2021). Son ürün olarak beklenen  $\text{CaO}$ 'ın tamamen kızdırılması sabit ve yüksek bir sıcaklık gerektirdiğinden, tarihi kireç fırınlarının bu teknolojiyi kimi zaman sağlayamaması sonucu sönmemiş kirece dönüşmemiş kireçtaşı yumruları sık sık oluşmaktadır (Torraca, 2009). Yüksek bir üretim teknolojisi, kireç fırının sorunsuz çalışmasını veya çıkan ürünün elenerek bu kireçtaşı yumrularından temizlenmesini sağlayacaktır.

Sönmemiş kirecin ( $\text{CaO}$ ) su ile hidratasyona sokulması ile sönmüş kireç ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) elde edilmesi süreci, genellikle ahşap kireç söndürme havuzlarında başlatılıp kireç kuyularında tamamlanır (DeLaine, 2021). Kuyu içerisindeki kirecin hava ile temasını engelleyecek miktarda suyun yavaşça eklenmesi ve bekletilmesi, kirecin kalitesini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Torraca (2009), Vitruvius'un tarifine göre kirecin kuyularda bekletilme süresinin en az 1 yıl olması gerektiğini aktarır. Sönmüş kirecin bekleme süresinin uzunluğu,  $\text{Ca(OH)}_2$  parçacıklarının boyutunun küçülmesine sebep olur. Bu durum doğal olarak bağlayıcılık özelliği gösteren parçacıkların yüzey alanının artması ile sonuçlanır. Dönüşüm ne kadar fazla ise bağlayıcılık ve volkanik kökenli veya yapay haldeki amorf özellikteki reaktif minerallerden oluşan puzolanla reaksiyona girme oranı o derece artar (Kurugöl, 2017). Ortaya çıkan ürün ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), havadaki  $\text{CO}_2$  ile reaksiyona girecek ve sertleşerek planlanan inşaat sürecinde kullanılabilir. Kirecin kuyularda bekletilmesi esnasında üzeri hava almayacak şekilde su ile kapatılması, kullanım öncesi  $\text{CO}_2$  ile reaksiyona girmesini önleyecektir. Hava kireci ortamdaki  $\text{CO}_2$  varlığına ihtiyaç duyduğundan, uygulama sonrası hava ile teması kesildiğinde (su altında) veya aşırı nemli ortamlarda planlanan reaksiyona bağlı sertleşmesini gerçekleştiremeyecektir.  $\text{CO}_2$  varlığının olmadığı durumlarda, suyla reaksiyona giren farklı özelliklere sahip ürün ise hidrolik kireç bağlayıcıdır.

Kireç harcı teknolojisinin gelişimi, dönemin inşaatçıların sayısız denemeleri sonucu edindikleri tecrübelerinin bir bütünü olarak karşımıza çıkar. Kireç harcı, teknolojik bakımdan bu deneme süreçlerinden edinilen tecrübeler ile geldiği en yüksek teknolojiyi literatüre göre Roma Döneminde yakalamıştır (Torraca, 2009). Yazılı kaynakların gösterdiği, en azından MÖ 1. yüzyılda, inşaatçıların yapı teknolojisi ve kullanılacak malzemelerin doğru seçimi ile ilgili küçümsenmeyecek bir bilgi birikimine sahip olduklarıdır (DeLaine, 2021). Kirecin en saf halinin kullanılması gerekliliğini belirten Vitruvius bu önerisi ile esasen hidrolik olmayan kireç bağlayıcının üretimini, bilinçli veya bilinçsiz bir şekilde tarif etmiştir. Günümüzde Roma Betonuna (*opus caementicium*) olarak bilinen ve bilinirliğini sağlam ve dayanıklı yapısından alan kompozit karışım ise hidrolik özellikli bir kireç harcıdır. Hidrolik özellik, bağlayıcının su altında da sertleşebilmesini işaret eder (Elsen ve ark., 2012). Harçlara hidrolik özelliğini, içerisinde kil bulunan kireç taşından elde edilen doğal hidrolik kireçler ve/veya harca katkı ve dolgu maddesi olarak katılan doğal ve yapay puzolanlar vermektedir.

Kireçlerin sınıflandırılmasında, hidrolik özelliğin keşfine dair ilk bilimsel çalışmalar John Smeaton'a aittir (Trout, 2019). Elsen vd. (2012) çalışmalarında Smeaton'ın, içerisinde kil bulunan kireç taşından elde edilen kirecin su altında sertleşme özelliğinin, saf kireçtaşından elde edilen kirece oranla bir hayli yüksek olduğunu kanıtladığını bildirmektedir. Yine aynı çalışmalarında yazarlar, hidrolik özelliğin sınıflandırılması ile ilgili ilk bilimsel çalışmaların ise Lois Vicat tarafından ortaya atıldığını bildirir. Vicat, hidrolik özelliği ilk kez  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  varlığı

ile ilişkilendirmiştir. Kil içerikli kireç taşlarının içeriğinde bulunan  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , kireç üretimi esnasındaki yüksek sıcaklık (kalsinasyon) sebebiyle aktif di-kalsiyum silikatlara ( $\text{C}_2\text{S}$ ) ve monokalsiyum alüminatlara (CA) dönüşür ve bağlayıcıya hidrolik özelliğini kazandırır (Collepari, 1990).

Doğal hidrolik kireçlerin üretimi için gerekli olan, içerisinde kil mineralleri barındıran kireçtaşlarının kil miktarının en az %10-15 arasında olması öngörülür ve bu kireçtaşlarından elde edilen ürün, saf kireçtaşından elde edilen kirecin söndürülmesi işlemindeki gibi su ile söndürüldüğü takdirde sertleşerek kullanılmaz hale gelebilir. Az miktarda su ile kontrollü bir söndürme işlemi yapılan bu kireç toz halde elde edilir, sönmüş haldeki bu kirecin su ile karıştırıldıktan sonra ise kullanım ömrü gayet kısadır (Torraca, 2009).

Kireç harçlarına hidrolik özelliklerin kazandırılmasının bir diğer yolu ise puzolanların (doğal aktif killer) kireç harcına katılmasıdır. American Society of Testing and Materials (ASTM) C618-22 Standartı, puzolanları tarif ederken, yalnız başına kullanıldıklarında bağlayıcılık özelliklerinin çok az olduğunu veya hiç olmadığını, ancak uygun nem ve normal ortam sıcaklığında sönmüş kireç ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ile reaksiyona girdiğinde bağlayıcılık özelliği kazandıran ürünler ortaya çıkaran ince toz halindeki malzemeler olarak tanımlar (ASTM C618-22, 2023). Puzolanlar doğal (volkanik kül, tuf, tras vb.) veya yapay (pişmiş toprak seramik ve tuğla, silis dumanı, piring kabağı külü vb.) olarak elde edilirler (Kurugöl, 2017).

Puzolan kelimesi, Vezüv bölgesinde yer alan, Pozzuoli şehriden ismini almıştır. Torraca (2009) çalışmasında, atıfta bulunulan bu puzolanın oluşumunu volkanik patlama sonrası havaya püsküren silisli malzemelerin birikmesiyle oluşan bir toprak türü olarak tanımlar. Vitruvius, Baiæ çevresinde (Pozzuoli yakınları) ve Vezüv bölgesindeki bu toprağı tanımlarken, olağanüstü niteliklere sahip bir kum türü olduğunu, harç ve moloz ile karıştırıldığında su altında sertleşme özellikleri gösterdiğini yazar (Trout, 2019). Kurugöl (2017) puzolanik reaksiyonun kalsiyum hidroksitin ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) meydana getirdiği alkali seviyesi yüksek bir çözeltide, ortama yayılan kalsiyum iyonlarıyla ( $\text{Ca}^{2+}$ ) puzolanın amorf özellikteki reaktif mineralleri arasındaki kimyasal etkileşimle meydana geldiğini belirtir (Tablo 2).

**Tablo 2** Puzolan katkıları ile gerçekleşen hidrolik sertleşme reaksiyonu ve oluşan ürünler (Lechtman ve Hobbs, 1986)

$\text{CaO}_{\text{ kireç}} + [x\text{SiO}_2 \bullet y\text{Al}_2\text{O}_3 \bullet z\text{Fe}_2\text{O}_3]_{\text{ reaktif puzolan}} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{hidrat}$		
$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \bullet 3\text{H}_2\text{O}$	jel	(tobernit, C-S-H)
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$	çubuk ve lif	(etrenjit, $\text{C}_3\text{AH}_6$ )
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	levha	(portlandit, CH)
$\text{C} = \text{CaO}, \text{S} = \text{SiO}_2, \text{H} = \text{H}_2\text{O}, \text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$		

Hobbs ve Siddall (2011) çalışmalarında, C-S-H jel fazının üretiminin boşluk doldurucu, yapıştırıcı ve mekanik kilitleme rolü üstlendiğini ve puzolanların özellikle nemli ortamlarda prizlenme özelliğine dikkat çekerek, puzolanik harçların maksimum mukavemete ulaşması için sertleşme esnasında nemli tutulması gerektiğini belirtmiştir.

Doğal puzolanların yanında kireç harcının özelliklerini değiştirme veya iyileştirme amacıyla kullanılan yapay puzolanların etkisi de uzunca bir zamandır bilinmektedir. Fenikeliler Dönemi'ne (MÖ. 10.yüzyıl) kadar uzanan bir periyotta, tuğla tozu ve kırığının harçlarda hidrolik özellik kazandırılmak amacıyla kullanıldığı, çeşitli bilimsel çalışmalarda gösterilmektedir (Baronio & Binda, 1997; Kurugöl, 2017). Kil mineralleri 400-800°C'de pişirildiğinde, oluşan amorf reaktif ürünler sayesinde puzolanik aktivite özelliği göstermektedir (Böke ve ark.,

2006). Kurugöl (2017) çalışmasında, sıcaklığın 900°C üzerine çıkması ile kararlı minerallerin oluştuğunu, böylelikle puzolanik aktivitenin kaybolduğunu belirtmektedir. Torraca (2009) çalışmasında, Antik Roma döneminde (MÖ. 6.yüzyıl ile MS. 1.yüzyıl arası) görülmeye başlanan, “*cocciopesto*” adı verilen kireç harcının içerisine pişmiş toprak ürünlerinin kırılmış ve öğütülmüş halinin eklenmesinin, hidrolik özelliğın talep edildiğı ve doğal puzolanların bulunamadığı durumlarda tercih edildiğini bildirmektedir. Bizans döneminde, su ile temas halinde olan hamam, su kanalı, su kemeri, liman yapıları, sarnıç vb. yapılarda sıklıkla karşımıza çıkan bu kompozit ve hidrolik özellikli harç tipini en yoğun şekliyle Osmanlı döneminde horasan harcı adıyla görmekteyiz (Polat Pekmezci, 2012; Torraca, 2009).

### 1.2. Agregası

Kireç harcının bir diğeri önemli bileşeni ise agregasıdır. EN (Europeane Norm) 16572 Standardı agregayı; harçta kullanılan çeşitli boyutlardaki doğal sedimanlar veya kırılmış taş veya diğeri yapay malzemelerin parçacıkları şeklinde tanımlarken, 4 mm ve 0,063 mm arasında kalan ince agregaları kum olarak tarif etmiş ve agrega boyutunu 0,063 mm'den büyük parçalar için belirlemiştir (EN 16572, 2015).

Agregalar çoğunlukla doğada parçalanmış ve/veya kırılmış doğal taşlar ve pişmiş toprak ürünlerden elde edilir. Kırılarak öğütülen bu agregaların bir bağlayıcı sisteme eklenmesinin, hacim stabilitesine, dayanıklılığa ve yapısal performansa katkıda buldukları için teknik avantajlar sağladığı kanıtlanmıştır. Harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin bir kısmı, dolaylı olarak agreganın cinsine, özelliklerine, tane boyut dağılımına ve aynı zamanda bağlayıcı/agrega oranına göre önemli ölçüde değişir (Stefanidou & Papayianni, 2005). Öğütülen agregalar harcın içerisine genellikle rastgele eklenmez. Eski inşaatçıların uzun yıllar boyunca edindikleri deneyimler, harçların fiziksel ve kimyasal etkilerini arttırmada agreganın rolü ve boyutları ile ilgili de tecrübe edinmelerini sağlamıştır. Çeşitli dönemlere ait harçların incelendiğı bilimsel bir çalışmada, agregaların belirli boyut aralıklarında kullanıldıkları tespit edilmiştir (Pachta ve ark., 2014). Bu durum üretim teknolojisinin anlaşılması adına da değerlidir. Yapılan bazı bilimsel araştırmalar, uygun agrega boyutu ve miktarı ile hazırlanan harçlarda yoğunluğun arttığı, gözenekliliğın (tür ve boyutu dikkate alınmak şartı ile) azaldığı ve buna bağlı olarak mukavemetin arttığı yönündedir (Ferreira ve ark., 2021).

### 1.3. Katkı ve Katkı Maddeleri

Tarihi kireç harçlarının içerisine, harcın taze ve sertleşmiş özelliklerini, yani işlenebilirlik, sertleşme süresinin ayarlanması, dayanıklılık, mukavemet vb. özelliklerini geliştirmek adına bazı organik ve inorganik katkı ve katkı maddeleri de eklenmektedir. EN 16572 Standardı katkı ve katkı maddelerini tanımlarken; katkı maddesini (additive), harcın imalatı esnasında bağlayıcı içerisine küçük miktarlarda eklenen (hızlandırıcı, plastikleştirici, hava sürükleyici vb.) ve özelliklerini değiştirmek veya iyileştirmek amacıyla kullanılan ilave, katkıyı (admixture) ise, harç karışımının özelliklerini değiştirmek için karışım içerisine ağırlıkça en az %1 oranında eklenen bağlayıcı, agrega ve su dışında kalan ek malzeme olarak tanımlar (Maravelaki ve ark., 2023, EN 16572, 2015). Doğal ve yapay puzolanik malzemeler de inorganik katkı maddeleri sınıfında değerlendirilebilir. Katkı maddeleri ve katkıları, harçların uygulama aşaması ve uzun vadeli kullanım koşullarının iyileşmesi adına önemlidir (Tekin & Kurugöl, 2012).

## 2. TARİHİ KİREÇ HARÇLARININ KARAKTERİZASYONU

Tarihi yapılar, günümüz yapım teknolojilerinin aksine, standart üretim teknolojisinin yetersiz olduğu, birçok farklı malzemenin bir araya gelmesiyle oluşturulmuş ve yapı teknolojisinin tecrübelerine dayanarak ortaya konduğu sistemlerdir. Dolayısıyla yapıların bozulma durumları, zamana bağlı etkilerle olduğu kadar, yapım teknikleri ve hatta çevresel faktörlere de bağlı gelişebilmektedir (Uğur & Güleç, 2016). Bu anlamda koruma laboratuvarlarının yapıların malzeme ve strüktürleri ile ilgili sorunları yanıtlama potansiyeli gayet yüksektir. Günümüz koruma anlayışında, konusunda uzman kişilerce yürütülecek olan görsel, basit ve ileri teknik analizler, yapıların mevcut durumu, malzeme çeşitleri, bozulma süreçleri vb. konuların aydınlatılmasında önemli bir yer tutmaktadır (Polat Pekmezci, 2023). Yapıların korunmuşluk durumu, bozulmayı etkileyen faktörlerin bir kısmı ve basit uygulama yöntem ve malzemelerinin tespiti için yapılacak basit analizlerin yanında, malzemelerin iç yapılarını inceleyen, imalat süreçlerinin ve yapım tekniklerinin de ortaya çıkarılması çabası yanında tarihsel sürecinde aydınlatılmasına da yardımcı olabilecek ileri teknik analiz yöntemleri de mevcuttur. (Ersen & Güleç, 2009). Kireç harçlarının karakterizasyonu çalışmaları, örneklerin yapı üzerinden alınması ve makro gözlemleri ile başlar, fiziksel ve mekanik özelliklerinin ortaya konması adına yapılan deneyler ve kimyasal ve mikro yapılarının araştırılması adına yapılan analizler ile laboratuvar ortamında sonuçlandırılarak koruma ve onarım çalışmalarına yardımcı olacak bilgileri ortaya koymayı amaçlar (Kahraman, 2008).

### 2.1. Karakterizasyon Çalışmaları

Tarihi kireç harçlarının karakterizasyonu çalışmalarının genel anlamda iki amacı vardır; ilki planlanan koruma ve onarım çalışmalarını projelendirmek üzere problemlerin tespiti ve özgün yapı ve malzemelerle uyumluluk ilkesi gereği kullanılacak ikame malzemelerinin belirlenmesi adına karakterizasyon çalışmalarının yapılması, ikincisi ise yapıların ve yapı malzemelerinin yapısal, fiziksel ve kimyasal yapılarının araştırılması ile uzun vadeli koruma planlarının çıkarılması, aynı zamanda yapım tekniklerinin ve üretim tekniklerinin belirlenmesi ile koruma planına katkı sağlamasıdır (Hughes ve Callebaut, 2002). Dolayısıyla yapılacak analizlere dair örneklerin seçimi, bu örneklerin miktarları, analizlerden beklenen sonuçlar ve/veya potansiyel sonuçlar bu amaçlara uygun şekilde belirlenmektedir.

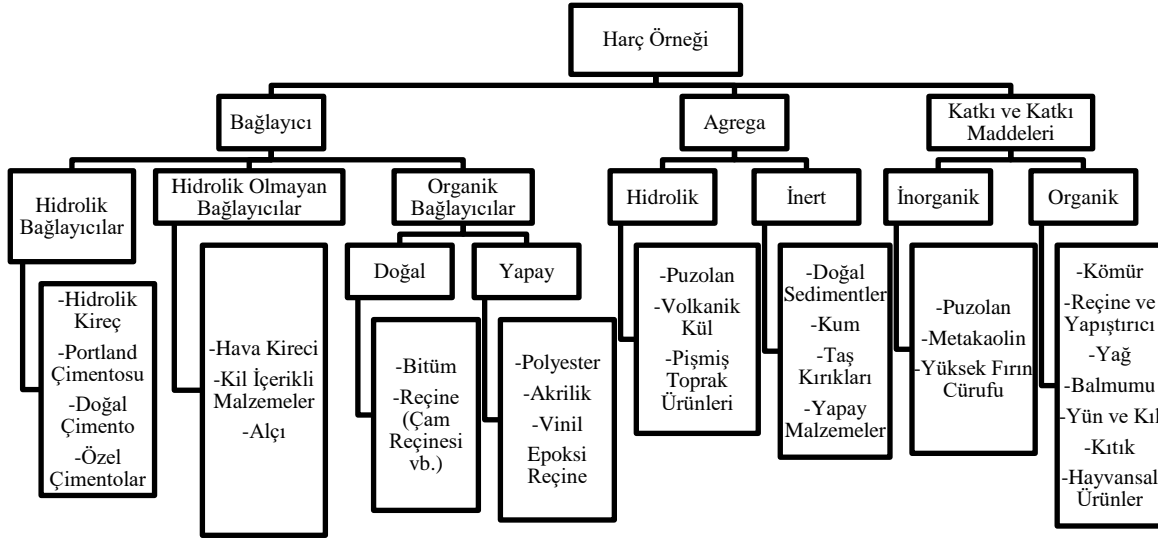
Tarihi harçların karakterizasyonu çalışmaları dört basamakta ilerlemektedir. Bunlardan ilki yapının görsel analizi, sorunların tespiti ve buna bağlı örnek yerlerinin belirlenmesi, ikincisi analizi yapılacak örneklerin alınması, üçüncüsü alınan örnekler üzerinden amaca yönelik saha ve laboratuvar analizleri ve dördüncüsü sonuçların değerlendirilmesi şeklindedir. Bu durumda yapının dönem analizi dahil gerekli belgeleme rapor ve çizimleri ile yapıya dair yeterli bilginin sağlanması ve belirgin bozulma sebeplerinin ve muhtemel kaynaklarının doğru tespiti ile analizi yapılacak malzemelerin belirlenmesi gereklidir. Örnek miktarlarının gerekenden fazla (planlanan analiz prosedürlerinin ihtiyacı olan standart miktarlar) olması, koruma yaklaşımının en az müdahale felsefesiyle çelişecek ve analiz sürecinin de ekonomik açıdan verimsiz olmasına sebep olacaktır. Bu sebeple analizi yapılacak örneklerin, analizi yapan kişiler ve/veya analiz sürecine hâkim olan projede sorumlu koruma uzmanları tarafından belirlenmesi gereklidir. Böylelikle uygun olmayan örneklerin analiz sürecine dahil edilmesi engellenebilir.

Analizi yapılacak örneklerin belirlenmesi sonrası, bu örneklerin yapı üzerindeki yerleri, mevcut belgeleme çizimlerine veya diğer dokümanlarına işlenmeli, örnek alınan bölgenin detaylı fotoğrafları – üzerinde örnek numarasının da olması şartı ile – çekilmeli ve yapının örnek alınan yeri kısaca yazı ile tarif edilmelidir. Alınan numunelerin cinsleri ve hangi amaçla alındıkları da bu aşamadaki belgeleme sistemine eklenmelidir (Ersen ve ark.,

2014). Hughes ve Callebaut (2002) çalışmasında, analizi yapılacak örneklerin sahada belgelenmesi işleminin, ileride yapılacak akademik araştırmalar adına, sonuçların güvenilirliği bakımından da önemli olduğunu belirtir. Bu durum yeniden örnek almanın imkânsız olduğu durumlar için de geçerlidir. Laboratuvar analizlerinde kullanılacak örneklerin, analiz sonuçlarının doğrulanabilmesi ve karşılaştırılabilmesi adına her bir örnek noktasından 3'er adet alınması tavsiye edilmekte, örnek toplamanın zorlukları göz önüne alınarak, analizlerden doğru sonuçlar alınabilmesi için en az 10 gram olmak koşulu ile yaklaşık 25-50 gram ağırlığında olması önerilmektedir (Ersen ve ark., 2014). Bu miktarlar, normal şartlar altında belirlenmiş olup, daha az örnek miktarının alınabileceği durumlar için geçerli değildir. Harç, sıva vb. örnekler, kritik miktarlarda yapıdan alınabildiği için, örneklerin laboratuvar ortamına taşınması esnasında zarar görmemeleri adına koruyucu önlemlerin alınması gereklidir. Plastik ve kilitli poşetler içerisine, tüm belgeleme kodlarının kısaca tarif edilerek üzerine yazıldığı ve nemden etkilenmeyecek fişleri ile konulacak örnekler, plastik sert kutular ile laboratuvara taşınmalıdır.

Tarihi harçların laboratuvar incelemeleri ise, öncelikle örneklerin laboratuvar ortamında makroskobik analizi ve buna bağlı belgeleme çalışmaları ile başlamaktadır. Sahadan alınan örnekler ve beraberindeki belgeleme dokümanları ışığında, örneklerin makroskobik analizleri yapılarak belirli standartlarda fotoğraflarının çekilmesi ile laboratuvar analizi süreci başlatılır. Örneklerin fotoğraflarının çekimi, uygun ölçekler ve Munsell renk sistemi yardımı planlanması önerilir (EN 17187, 2020). İlk incelemeler sonucu, örneklerin genel durumu, rengi, dokusu, miktarı, hangi amaçla alındıkları ve beklenen sonuçlar ışığında analiz yöntemleri arkeometristler tarafından belirlenir. Bu aşamada yeniden örnek alma ihtiyaçları da tespit edilebilir. Tarihi harçların karakterizasyonu kapsamında, harcın yapısını oluşturan bağlayıcının cinsi, agreganın cinsi ve boyutları, bağlayıcı/agrega oranı (B/A) ve katkıların cinslerinin tayini ile harcın fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır (Şekil 1).

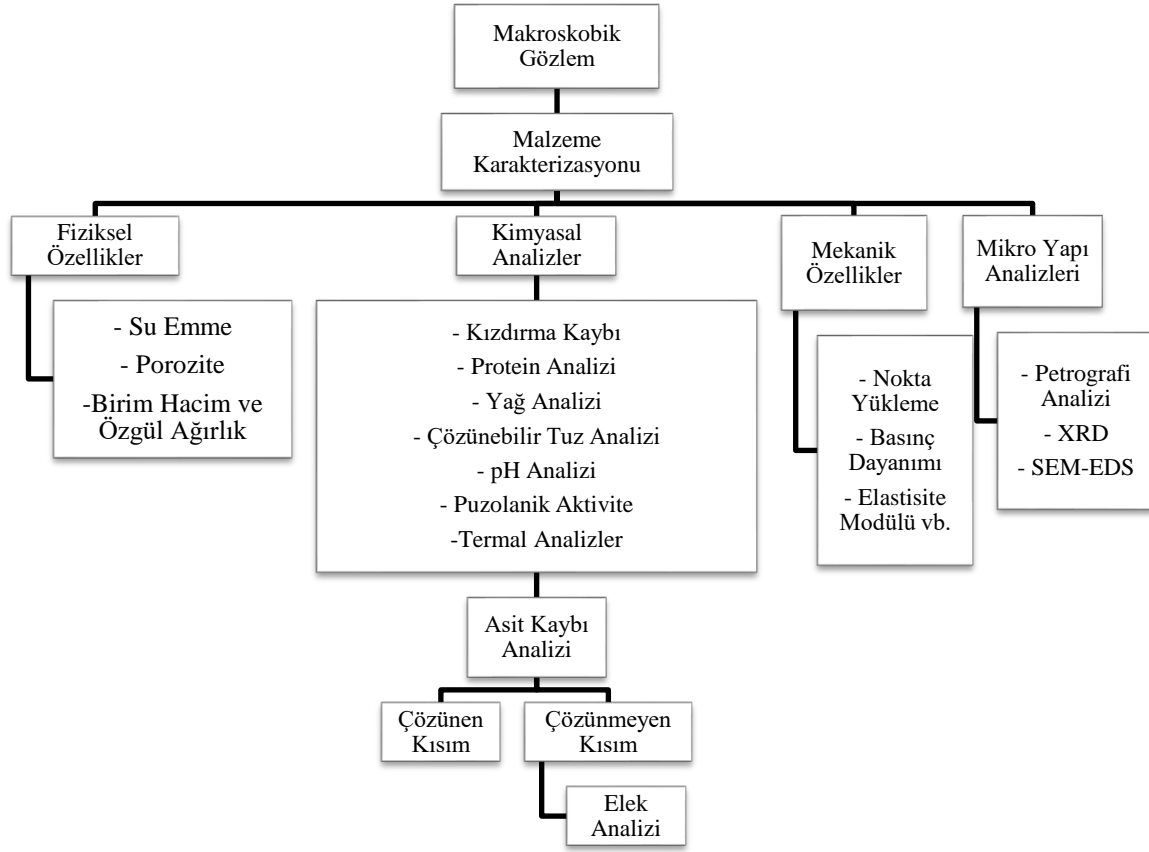




Şekil 1 Kireç harcı bileşenleri şeması (EN 17187, 2020).

## 2.2. Analiz Yöntemleri ve Sonuçları

Kireç harçlarının laboratuvar ortamında belgeleme işlemleri ve makroskobik incelemeleri sonrasında uygun analiz yöntemleri laboratuvar uzmanları tarafından belirlenir. Bu durumda, analiz sonuçlarından beklenen veriler doğrultusunda harç örneğinin fiziksel, mekanik, kimyasal ve mikroskobik incelemeleri başlatılır (Şekil 2). Analiz yöntemleri, hazırlanan konservasyon raporunun amacına ve ihtiyaç duyulan verilere göre değişiklik göstermektedir. Koruma ve onarım çalışmaları, malzeme araştırmaları ve tarihsel/arkeolojik araştırmalar doğrultusunda gerçekleştirilen bu analiz yöntemlerinin tüm basamaklarının her zaman tamamlanması beklenmez. Bu prosedürün işleyişi kimi zaman ekonomik sebeplerle, kimi zaman örneklerin yetersizliği, kimi zaman ise mevcut ekipman ve uzmanların eksikliği sebebi ile de yarım kalabilmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere, analiz sürecinin aşamaları tüm bu şartlar göz önünde bulundurularak en elverişli ve sürdürülebilir şekliyle programlanmalıdır.



Şekil 2 Kireç harçlarının analiz yöntemleri, (Kahraman, 2008) yayınından derlenmiştir.

### 2.2.1. Fiziksel Özellikler

Harçların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, kompozit yapının genel olarak su emme kapasitesi, kütle ölçümleri, gözeneklilik (porozite) çeşit ve dağılımları gibi özelliklerinin ortaya konması amacıyla yapılır. Onarım harçlarının belirlenebilmesi adına da önemli bir aşama olan bu analizler, karakterizasyonu adına planlanacak diğer analizler ile de bağlantılar kurması açısından faydalıdır.

#### a. Su Emme Deneyi

Harcın fiziksel özelliklerinin belirlendiği analizlerde biri su emme deneyidir. Su emme deneyinde gözenekli numunelerin (harç, taş, tuğla vb.) kütle ve hacimce su emme miktarları hesaplanır. Su emme deneyleri, belirlenen standartlar dahilinde harcın laboratuvar ortamında çeşitli yöntemler ile su emme miktarlarını belirlemek için kullanılır. Su emme deneyi sonuçları, malzemenin açık gözenekliliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu deney kapsamında, özgün harçların su emme miktarının tayini yanında, onarım için üretilecek harçların su emme miktarlarının tespiti ve taş ve tuğla gibi malzemelerin su emme miktarları ile karşılaştırmaları, koruma ve onarım faaliyetlerine yön vermesi bakımından tercih edilmektedir. Özgün harçların su emme kapasitesi ve kuruma döngüsü, su ve nem kaynaklı (donma-çözülme, çözünabilir tuz hareketleri, nem kaynaklı kimyasal bozulmalar) olası hasarların tahmin edilmesinde de kullanılabilir. Bu hasarların önlenmesi adına kullanılan kimyasallardan biri de su itici malzemelerdir. Buhar geçirgenlikleri yüksek su itici malzemelerin gözenekli yüzeylere uygulandığı bir deneysel çalışmada, kuruma döngüsüne dikkat çekilmiş ve su itici malzemelerin kuruma döngüsünü uzattığı bildirilmiştir (Groot ve Gunneweg, 2012). Dolayısıyla harçların su emme testleri ile elde edilecek sonuçlara göre koruma ve onarım çalışmalarında kullanılacak malzemelerin özellikleri belirlenebilmektedir.

### b. Porozite Tayini

Fiziksel özellik analizlerinden biri olan porozite tayini, harcın fiziksel yapısını anlayabilmek için önemli bir yer tutmaktadır. Bu analiz ile, porozite cinsi, miktarı ve dağılımı hakkında veriler elde edilebilmektedir (Ersen ve Güleç, 2009). Porozite, harcın nem taşınması, mekanik özellikleri, dayanıklılığı, sertleşme esnasındaki davranışları ve harcın duvar ile uyumluluğu gibi konularda etkili faktörlerden biridir. Harçların porozitelerinin belirlenmesi, diğer analiz sonuçları ile de bağlantı kurulabilmesi adına dikkatle takip edilmelidir. Porozite, International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) tarafından boyutları bakımından üç bölümde incelenir. Bunlar; mikro gözenekler (< 2 nm), mezo gözenekler (2 nm -50 nm aralığı) ve makro gözenekler (> 50 nm) olarak belirlenmiştir (1 nm = 10<sup>-6</sup> mm) (Thomson ve ark., 2004). Kılcal (kapiler) hareket ile nem transferleri, makro gözenek boyutunda ve 0,1 µm ile 100 µm arasında gerçekleşir. 100 µm'den daha büyük gözenekler ise yerçekimi ve rüzgâr kaynaklı su geçirgenliğine katkıda bulunur. Açık, kapalı ve toplam gözeneklilik ölçümleri ile değerlendirilen gözeneklilik üzerine yapılan bazı çalışmalar, gözenekliliğin artışının (gözenek boyutunun artışı daha belirgin bir etki olarak belirtilmekte), kireç bağlayıcı içerisinde boşluklar yaratmasına bağlanarak harcın mukavemetinde azalmalara sebep olduğunu bildirmektedir (Trout, 2019; Thomson, 2004). Buna karşın Maravelaki vd. (2023), gözenekliliğin donma olaylarına ve çözünebilir tuz hareketlerine karşı, oluşacak fiziksel gerilmeleri sönmemesi ile harcın direncinin artmasına yardımcı olduğunu bildirerek, harca taze haldeyken eklenen katkı maddeleri ile gözenekliliğin bilinçli oluşturulması durumlarını da örnek vermiştir. Hidrolik olmayan kireç esaslı harçlarda, gözenekler harcın içerisine CO<sub>2</sub> akışını hızlandırdığı için, karbonatlaşmayı tetikler. Dolayısıyla bazı araştırmalar, uygun bağlayıcı/agrega oranına sahip hava kireci esaslı harçların gözenekliliğinin, mekanik özelliklerin azalmasına sebep olmadığını bildirir (Lanas & Alvarez, 2003). Thomson ve ark. (2004), onarım harçları hazırlanırken, özgün harcın toplam gözenekliliğinin kopyalanması işleminin bazı zorluklar içerdiğinden bahsederken, gözenekliliğin yıllar içerisinde değişkenlik göstermesi ve referans alınacak gözenekliliğin hangi zamanda oluşacak gözeneklilik olduğuna karar vermenin zorluğunu ortaya koyar. Bazı araştırmalar ise, karakterizasyon çalışmaları kapsamında yapılacak analizler sonucu içeriği belirlenip önerilecek onarım harçlarının özgün malzemeler ile uyum sorunu yaşamayacağını savunmaktadır (Ersen ve Güleç, 2009).

### c. Birim Hacim Ağırlığı (Görünür Yoğunluk) ve Özgül Ağırlık (Gerçek Yoğunluk) Analizleri

Su emme deneyi sonuçlarında da faydalanarak hesaplanan yoğunluk hesaplamaları, harçların mekanik özellikleri ile de ilişkilendirilebilmektedir. Araştırmacılar, yoğunluk ve gözeneklilik arasında güçlü bir ilişki olduğunu belirtirken, gözenekliliğin azalmasının yoğunluğun artışına sebep olacağını, bu durumda harçların mekanik özellikleri ile ilişki kurulabileceğini belirtmektedir (Frankeová ve ark., 2012). Bu durum, onarım harçlarının üretiminde kullanılan malzemelerin tercihi, bağlayıcının cinsi, katkı maddelerinin cinsi ile ilişkili olduğu kadar, taze harcın uygulanmasındaki yöntemlerle de değişebilmektedir. Stefanidou vd. (2005) çalışmalarında, taze harcın (henüz sertleşmemiş, şekil verilebilir haldeki) yerleştirilmesindeki sıkıştırma uygulamalarının, harcın gözenekliliğinde azalma yaratarak yoğunluğunun artmasına, bu sebeple uzun vadeli mukavemetlerinin de artmasına sebep olduğunu bildirmektedir.

## 2.2.2. Kimyasal Analizler

Harçların kimyasal analiz yöntemleri, agrega ve bağlayıcı cins ve oranlarını belirlemede uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu anlamda 1960'lı yıllardan beri literatür çalışmalarında sıklıkla görülen analiz yöntemleri

bağlayıcı ve agrega cinsi, agrega dağılımları ve miktarı ve bağlayıcı/agrega oranlarının tespiti çalışmaları yapılmaktadır (Jedrzejewska, 1960).

*a. Asit Kaybı Analizi*

Kimyasal analiz yöntemlerinden biri, örneklerin seyreltik (%10) HCl (hidroklorik asit) ile muamele edilmesi ile yapılan asit kaybı analizidir (Ersen ve Güleç, 2009). Asit kaybı analizinin teorik beklentisi, kireç bağlayıcının asit ile reaksiyona girmesi ve asit reaksiyonundan etkilenmeyecek olan silisli agreganın bozulmadan kalması üzerine kuruludur. EN 17187 Standardı, bu durumda dikkat edilmesi gereken unsurun, kireçtaşı (karbonatlı) parçacıklarından oluşan agregaların da asit ile reaksiyona girmesi olduğuna dikkat çekmiş ve bu durumun sonuçları etkilemesi ile B/A oranlarında yanılmalara sebep olacağını belirtmiştir (EN 17187, 2020). Asit kaybı analizi tek başına doğru bilgi sağlamada yetersiz kalabilmektedir. Kireç ihtiva eden agreganın varlığı veya asitte çözünebilir malzemelerin bulunması, analiz sonuçlarının yorumlanmasında diğer yöntemlerin desteğine ihtiyaç doğurur (Middendorf ve ark., 2007). Araştırmacılar agregada kireçtaşı esaslı malzemelerin varlığının tespitinde XRD (X-ışınları difraksiyonu) ve petrografik analizleri önermektedir (Candeias ve ark, 2006). Asit ile reaksiyona girmeyen agregalar, elek setinden (8000µ ile 63µ aralığında) geçirilerek ayrılır, böylelikle agreganın boyut dağılımı, oranı ve tipi incelenebilir bir hal alır.

*b. Kızdırma Kaybı Analizi*

Bir diğer kimyasal analiz yöntemi de kızdırma kaybı analizidir. Kızdırma kaybı analizi, harç numunelerinin sürekli artan sıcaklık altında meydana gelen ağırlık değişimlerinin ölçülmesi ve bu değişim miktarlarından faydalanarak 105 °C'de nem, 550 °C'de molekül suyu (bağlı su) ve organik madde miktarının belirlenmesi ve 1050 °C'de CO<sub>2</sub> kaybından CaCO<sub>3</sub> miktarının hesaplanması üzerine kurulu bir yöntemdir (Dean, 1974; Güleç, 2020). Araştırmalar, kızdırma kaybı analizi sonuçları ile ortaya çıkan CO<sub>2</sub> kaybı ile bağlı su (H<sub>2</sub>O) kaybının oranı (CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O) üzerinden bağlayıcının hidrolik olup olmadığının anlaşılabilirliğini belirtmektedir (Altaş ve ark., 2012).

*c. Protein ve Yağ Analizleri*

Protein ve yağ analizleri, harcın içerisinde bulunan bağlayıcı, katkı ve katkı maddelerinin bazılarının tespitinde kullanılmaktadır. Sıvalarda genellikle katkı maddesi olarak görülebilen protein, boyalarda bağlayıcı olarak kullanılabilir. Analiz sonucundan alınacak veriler ile koruma ve onarım malzeme ve yöntemleri belirlenebilmektedir. Örneklerin içeriğinde yağ ve protein takibi yapılırken, ön incelemede veya saha analizinde, mevcut örneklerin dış etkenlerden kaynaklı yağ ve protein içerip içermeyebileceği belgelenmeli veya not alınmalıdır.

*d. Çözünabilir Tuzların Analizi*

Çözünabilir tuz analizleri, belirli standartlarda hazırlanmış olan örnek numunelerinin kalitatif ve kantitatif olarak içerisinde bulunan çözünabilir tuzların tayini için kullanılmaktadır. Hazırlanan numuneler içerisindeki tuzların cinsi ve miktarı üzerinden bozulmaların veya üretim aşamasının yorumlanması yapılabilir. Bu analiz kapsamında klorür (Cl<sup>-</sup>), nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sülfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) ve fosfat (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) varlığının tespiti yapılmaktadır. Çözünabilir tuzlar, harç içeriğine katılmış malzemelerden kaynaklandığı gibi, dış etkenlerden harç içerisine de yerleşebilmektedir. Bahsi geçen çözünbilir ve az çözünbilir tuzların harç içerisindeki ve yüzeyindeki hareketleri fiziksel ve kimyasal hasarlara sebep olmaktadır. Çözünbilir tuzların hareketi sebebi ile en sık görülen hasar cinsleri, harç ve diğer yapı elemanlarının yüzeyinde tuz lekelenmeleri biçiminde görülen çiçeklenme (efflorescence) ve yüzeye yakın malzemenin iç kısmında oluşan ve daha yoğun fiziksel hasarlar ile sonuçlanan kabuk altı çiçeklenme (crypto efflorescence)'dir.

*e. pH Analizi*

Harçların pH değerlerinin ölçümü, ortamın asidik, bazik veya nötr olması sonucundan, bozulmaların tespitini ve istenmeyen pH değerlerinin kaynaklarının tespitini sebebi ile önemlidir. Teutonico (1988) çalışmasında, yağmur ve kar gibi aşırı asidik veya alkali (bazik) olabilecek ve yapı malzemelerine zarar verebilecek durumların da analizinin önemine dikkat çekmiştir.

*f. Puzolanik Aktivite Analizi*

Analizler sonucu harçların hidrolik özelliklerinin tespiti gerçekleşmesi durumunda, hidrolik özelliğin sebebinin araştırılması adına bazı testler yapılmaktadır. Bu testler, yani puzolanik aktivite testlerini Kurugöl (2017) çalışmasında; kimyasal, fiziksel, mekanik ve ileri teknik analizler şeklinde sınıflandırılmıştır. Kireç harçlarına hidrolik özellikler kazandırmak amacı ile eklenen doğal ve yapay puzolanların tespiti ve onarım harçlarında kullanılması ile ilgili birçok bilimsel yayın mevcuttur. Puzolanik aktivitenin varlığı, akabinde bu aktiviteye sebep malzemenin cinsinin tayini ve tespit edilen puzolanın aktivite değeri bu araştırmaların konusunu oluşturur. Sıklıkla kullanılan puzolanik aktivite analizlerinden ilki; asit ve baz atakları ile harç örneğinde bulunan karbonat, silikat ve alüminatların elenmesi, kalan kristal haldeki puzolanın XRD ile incelenmesidir. Bir diğer analiz yöntemi ise doygun  $\text{Ca}(\text{HO})_2$  çözeltisi içerisine puzolanik aktivitesinin ölçülmek istenen malzemenin 125  $\mu\text{m}$  elek altı boyutlarında eklenmesi ve iletkenlik değişiminin ölçülmesi üzerine kuruludur (Kahraman, 2008). Puzolanların tayini, harçların yapım teknikleri açısından da önemli bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca yapım tekniğinin tespiti onarım malzemelerinin de özgün yapıyla uyumluluğu amacıyla başarılı bir sonuç çıkaracaktır. Bilimsel bir çalışma kapsamında, tarihi harçlarında hidrolik özellik tespit edilen Anemas Zindanları örneklerinde yapılan çalışmada, onarım harçlarının oluşturulmasında doğal bir puzolan malzeme kullanılmış, üretilen bu onarım harçlarının fiziksel, kimyasal, mekanik ve mikro yapı analizleri tamamlanarak onarım süreçleri adına başarılı sonuçlar alındığı kaydedilmiştir (Gürdal ve ark., 2009). Bir diğer bilimsel çalışmada, aynı duvar üzerinde aynı dönemde yapılan harçların bazılarının hidrolik, bazılarının ise hidrolik olmayan harçlardan üretildiğinin tespit edildiği örnekler de mevcuttur (Rappoport, 2016). Bu durum yapım tekniği açısından önemli bir veri olduğu kadar, onarım harçlarının tayini adına seçilecek örneklerin ve yapılacak analizlerin belirlenmesi içinde farklı bir bakış açısı vermektedir.

*g. Termal Analizler*

Termal analizler, termodinamik ve fizikokimyasal parametreler ile sıcaklık değişimleri arasındaki ilişkiyi analiz eden bir yöntemdir (Zhao ve ark., 2019). Malzeme içeriğinin tespitini termogarvimetrik analiz (TGA), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) yöntemleri ortaya koyar. Araştırmacılar bir vaka çalışmasında, termal analiz sonuçlarını XRD sonuçları ile birlikte değerlendirerek, nem değerleri de dahil olmak üzere, bağlı su ve hidrolik ürünlerin kütle kayıplarından harçlardaki hidrolik özelliğin tespitini ve bazı örneklerinde bulunan alçı varlığının tespitinin yapıldığını doğrulamıştır (Ferreira ve ark., 2021).

**2.2.3. Mekanik Özellikler**

Tarihi harçların mekanik özelliklerinin tespiti, bu deneylerin ihtiyacı olan standart kütle ve boyutların gerekliliğinden dolayı, alınan numunelerin şekil ve boyutlarındaki kısıtlamalar sebebi ile her zaman tamamlanamayabilmektedir. Genellikle özgün harçlar üzerinde nokta yükleme testleri ile alınan sonuçlar üzerinden gidilen mekanik özelliklerin tayini çalışmaları, laboratuvarında üretilen onarım harçları üzerinde tüm prosedürün işlenmesi ile gerçekleştirilebilir. Araştırmacılar özgün malzemenin deney standartlarına uygun miktarda elde

edilememesine dikkat çekerek, ultrasonik ses dalgası (UPV) veya Schmidt Çekici gibi in-situ deneyler ile mekanik özelliklerin tayini hakkında bilgi edinilebileceğini bildirmektedir (Loke ve ark., 2023). Mekanik özellikler, harcın bileşenleri ve fiziksel özellikleri ile doğrudan bağlantılı olduğundan, onarım harçlarının uygulama sonrası gösterecekleri performansların belirlenmesi adına önemli görülmektedir. Fakat yalnızca harçlar üzerinden mekanik özelliklerin belirlenmesi, yapıya dair statik durumun ortaya konması için yeterli değildir. Bu testler yapıyı oluşturan diğer elemanların da testleri ile beraber değerlendirilmektedir. Torraca (2009) çalışmasında, gözenekli bir yapı malzemesi olarak tanımladığı harçlardan bahsederken, atomik yapılarından örnek vererek, sert, katı ve kırılğan bir yapıda olduklarını belirtmiş, bu tip yapıların çekme mukavemetlerinin basınç mukavemetlerine oranla çok düşük olduğuna dikkat çekmiştir. Yapılan bir bilimsel çalışmanın sonuçları, puzolan katkılı kireç harçları (hidrolik özellikli) ile puzolan katılmayan kireç harçlarının mekanik değerlerini karşılaştırmış ve puzolan katkılı harçların mekanik özelliklerinin bu karşılaştırmada artışına dair sonuçları raporlamıştır (Sala ve ark., 2008). Bir başka çalışma olan İBB KUDEB tarafından hazırlanan yayında, çeşitli bağlayıcı türleri ve terkiplerde hazırlanmış birçok onarım harcının mekanik özelliklerinin sonuçlarını derlediği bir raporu, bilimsel araştırmalar ve koruma ve onarım uygulamalarına fayda sağlaması adına yayınlamıştır (İBB KUDEB, 2016). Loke vd. (2023), onarım malzemelerinin, çoğu durumda özgün malzemelerin dayanımlarına eşit veya daha düşük dayanımlara (çok zayıf dayanımlar kastedilmiyor) sahip olması gerektiği belirtir. Bu durum, malzemelerin tekil olarak fiziksel ve mekanik özelliklerinin benzerliğine yapılan atıf kadar, yapı statığının bütüncül çalışma prensiplerinin de göz önünde bulundurulmasını işaret etmektedir.

#### 2.2.4. Mikro Yapı Analizleri

Tarihi harç örneklerinin iç yapılarının incelenmesi çalışmalarını Kahraman (2008), bağlayıcı, agrega, katkı ve katkı maddelerinin varlığı, bunların mineralojik yapısı, bozulmadaki mineralojik evrelerin tespiti ve silikatlaşmış bileşiklerin incelenmesi adına yapıldığını belirtmektedir. Bu analiz çalışmaları, örneklerin ince kesitleri üzerinden yapılan petrografik analizler ve ileri teknik cihazlar yardımı ile gerçekleştirilir. İnce kesit analizleri yöntemi ile hazırlanan örnekler üzerinde yapılan incelemeler, agreganın tipi, boyutu, rengi, bağlayıcı üzerinde çözünebilir tuzların yarattığı bozulmalar gibi araştırmaların sonuçlarına ulaşılabilir (Candeias, ve ark., 2006). Petrografik analizler yardımı ile tespit edilemeyen çok küçük boyutlu mineral yapıları SEM-EDS (taramalı elektron mikroskobu-enerji dağılımı spektrometresi) ve XRD (X ışını kırınımı) cihazları ile gerçekleştirilir ve özellikle hidrolik yapıyı oluşturan evrelerin tespitinde kullanılır. XRD analizlerinin sonuçlarının değerlendirilmesine bir örnek Kurugöl (2017) tarafından verilmiş, tuğlaların pişirilme derecesinin tespitinde belirli sıcaklıklarda oluşan minerallerin varlığı ve yokluğu üzerinden bir çıkarım gerçekleştirmiştir. Yazar bu çalışmasında, 900°C ve üzerinde pişirilen tuğla ve seramik örneklerinde tespit edilecek mineralleri sıralarken, bu sıcaklığın pişmiş toprak ürünlerin yapay puzolanik özelliklerini kaybettiği nokta olarak belirtmiştir. Dolayısıyla kireç harçlarına katılan yapay puzolanların (pişmiş toprak ürünler) hidrolik aktivitesi ve yapım teknikleri açısından önemli bir tespit bu analiz yöntemi ile ortaya konabilmiştir.

### 3. SONUÇ

Tarihi harçların karakterizasyonu; konservasyon ve restorasyon çalışmaları, arkeolojik ve tarihsel araştırmalar, malzeme araştırmaları veya tüm bunların birleştiği kapsamlı bir proje dahilinde, görsel analizler ile başlayarak aletli analizlere kadar varan bir araştırma sürecidir. Bu sürecin ortaya konması, birçok farklı disiplinin kültürel

mirasın korunması kapsamındaki bilgi birikimine ihtiyaç duyar. Dolayısıyla bu sürecin her basamağı, yürütücülerinin sürece dair farkındalığını da gerektirir. Çeşitli yapı malzemelerinin bir araya gelmesiyle oluşturulan tarihi yapıların önemli bir kısmında karşımıza çıkan kireç harçları, yapıların bütüncül koruma-onarım projelerinde en hassas yaklaşılması gereken unsurlardan biridir. Tarihi yapılarda genellikle en basit görülen onarım faaliyeti, tahrip olmuş harç ve sıvaların ikame malzemeler ile yeniden uygulanmasıdır. Koruma-onarım projelerinde görsel uyumun çok daha önemli görüldüğü bu durum, harçların iç yapılarının araştırılması ve buna bağlı diğer araştırma konularının uygulama sahaslarında çalışanlar için ikinci planda kalmasına sebep olmaktadır. Uygulama sahasının tespit ettiği problemler, genellikle özgün harç ve sıvaların çeşitli sebepler ile tahrip olması olduğundan, bu soruna çözümün yalnızca onarım harcının ortaya konabilmesi üzerine geliştiği görülmektedir. Ne var ki, araştırma konusu olan harcın karakterizasyonu çalışmalarının, tarihi yapılara dair çok daha fazla soruya cevap verme potansiyeli mevcuttur. Bu durumun en verimli şekilde ortaya çıkarılabilmesi ise tüm uzmanların hem yapının yapım teknikleri, bozulma durumları ve malzeme üretim tekniklerinin genel hatlarına, hem de bu malzemelerin karakterizasyonu çalışmalarının bu soruları cevaplama potansiyeline hâkim olmasına bağlıdır. Dolayısıyla, özellikle tarihi yapıların konservasyon ve restorasyonu ile ilgilenen koruma uzmanlarının, tarihi kireç harçlarının üretim aşamalarına, harcın çalışma prensiplerine, harcı oluşturan malzemelerin çeşitlerine, harcın üretime dayalı veya çevresel faktörlerden kaynaklı bozulma süreçlerine ve tüm bu basamaklara dair soruları cevaplayabilecek koruma laboratuvarlarının potansiyeline hâkim olması gereklidir.

Koruma laboratuvarlarında koruma uzmanları ve arkeometristler tarafından gerçekleştirilen malzeme karakterizasyonu çalışmaları sonrası ortaya çıkan koruma ve onarım raporları içerisinde genellikle onarım harcı terkipleri de yer alır. Bu onarım harcı terkipleri, uygulama sahasında kimi zaman numuneler şeklinde kimi zaman da doğrudan duvar üzerinde uygulanmaktadır. Belirlenen terkiplerinden faydalanarak hazırlanan onarım harçlarının kimi zaman görsel ve fiziksel-mekanik uyumsuzluk gösterdiği bilinmektedir. Böylesi durumların önüne geçmek adına, koruma laboratuvarlarının ortaya koyduğu harç terkiplerini laboratuvar ortamında hazırlaması, fiziksel ve mekanik testlerini de gerçekleştirdikten sonra bu testlerin sonuçları ile yenilenmiş hallerini, görsel uyumsuzluğun da önüne geçebilmek adına örnek numuneleri ile birlikte uygulama sahasına teslim etmesi planlanabilir. Onarım harcının fiziksel ve mekanik uyumu kadar görsel uyumunun da göz ardı edilmemesi, yapının estetik değerinin korunması bakımından önemlidir.

Ülkemizde, 2022 yılı TÜİK verilerine göre 122.000'den fazla taşınmaz kültür varlığı olduğu raporlanmıştır. Bu miktarda bir yapı stokunun üzerinde yapılan tüm koruma ve onarım projelerinin ve bunlara bağlı konservasyon raporu ve malzeme karakterizasyonu çalışmalarının bir araya toplanabilmesi, ileride yapılacak çalışmalar adına önemli görülmektedir. Tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçlarının, araştırmacılar tarafından bir araya toplanmış ve derlenmiş şekilde okunabilmesi, koruma biliminin gelişimi adına önemli olduğu kadar, koruma ve onarım projelerinin ekonomik sürdürülebilirliği açısından da faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu anlamda ilgili bakanlıkların, yerel yönetimlerin, üniversitelerin ilgili bölümlerinin ve yine ilgili sivil toplum kuruluşlarının ortaklaşa ortaya koyabileceği bir envanter sisteminin tasarlanması planlanabilir.

**Kaynakça**

- Ahunbay, Z. (2014). *Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon*. İstanbul: YEM Yayın .
- Akman, M. S. (2003). Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi. *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*(426), 30-36.
- Altaş, G. K., Özgünler, S. A., & Gürdal, E. (2012). İstanbul'daki Roma Dönemi Saray Yapılarındaki Horasan Harçlarının İncelenmesi. *Restorasyon Yıllığı Dergisi*(4), 41-49.
- ASTM C618-22. (2023, Mart 23). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Materials.
- Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B., & Uğurlu, E. (2006). Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters. *Cement and Concrete Research*, 36, 1115-1122.
- Baronio, G., & Binda, L. (1997). Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and Building Materials*, 11(1), 41-46.
- Candeias, A. E., Nogueira, P., Mirao, J., Santos, S. A., Veiga, R., Ribeiro, I., . . . Seruya, A. I. (2006). *Characterization of ancient mortars: present methodology and future perspectives*. Evora University, National Laboratory of Civil Engineering (LNEC). Chairmen of the European Research Councils' Chemistry Committees.
- Carran, D., Hughes, J. J., Leslie, A., & Kennedy, C. (2012). A Short History of the Use of Lime as a Building Material Beyond Europe and North America. *International Journal of Architectural Heritage*, 6(2), 117-146.
- Collepari, M. (1990). Degradation and restoration of masonry walls of historical building. *Materials and Structure*(23), 81-102.
- Dürüşken, Ç. (2021). *Mimarlık Üzerine Vitruvius*. İstanbul: Alfa.
- Dean, W. E. (1974). Determination of Carbonates and Organic Matter in Calcereous Sediments and Sedimentary Rocks by Loss on Ignition: Comparison with other Methods. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44(1), 242-248.
- DeLaine, J. (2021). Production, Transport and on-site Organisation of Roman Mortars and Plasters. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 13(11).
- Dinçer, İ. (2013). Kentleri Dönüştürürken Korumayı ve Yenilemeyi Birlikte Düşünmek: "Tarihi Kentsel Peyzaj" Kavramının Sunduğu Olanaklar . *International Journal of Architecture and Planning*, 1(1), 22-40.
- Dix, B. (1982). The Manufacture of Lime And Its Uses In The Western Roman Provinces. *Oxford Journal of Archaeology*, 1(3), 331-346.
- Elsen, J. (2006). Microscopy of Historic Mortars—A Review. *Cement and Concrete Research*, 36(8), 1416-1424.
- Elsen, J., Van Balen, K., & Mertens, G. (2012). Hydraulicity in Historic Lime Mortars: A Review. J. Valek, J. Hughes, & G. Caspar içinde, *RILEM Book Series Historic Mortars Characterisation, Assessment and Repair* (Cilt 7). Springer.
- EN 16572. (2015, Haziran 20). Conservation of Cultural Heritage - Glossary of technical terms concerning mortars for masonry, renders and plasters used in cultural heritage. European Committee for Standardization.



- EN 17187. (2020, Nisan 30). Conservation of Cultural Heritage — Characterization of mortars used in cultural heritage. Birleşik Krallık: European Committee for Standardization.
- Ersen, A., & Güleç, A. (2009). Basit ve İleri Analiz Yöntemleri ile Tarihi Harçların Analizi. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*(3), 65-73.
- Ersen, A., & Verdön, İ. (2010). KONSERVASYON BİLİMİNİN RESTORASYON PROJE VE UYGULAMALARINA KATKILARI. *ÜBA-KED Türkiye Bilimler Akademisi Kültür Envanteri Dergisi*(8), 7-20.
- Ersen, A., Güleç, A., & Alkan, N. (2014). Konservasyon Raporunun Önemi, İçeriği ve Hazırlanma Adımları. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*(13), 3-17.
- Ferreira Pinto, A. P., Sena de Fonseca, B., & Vaz Silva, D. (2021). The role of aggregate and binder content in the physical and mechanical properties of mortars from historical rubble stone masonry walls of the National Palace of Sintra. *Construction and Building Materials*, 268.
- Frankeová, D., Sližková, Z., & Drdácý, M. (2012). Characteristics of Mortars from Ancient Bridges. J. Válek, J. J. Hughes, & C. J. Groot içinde, *RILEM Book Series Historic Mortars Characterisation, Assessment and Repair* (Cilt 7). Springer.
- Güleç, A. (2020). Eminönü Mısır Çarşısı Malzeme-Problem Karakterizasyonu ve Çözüm Önerileri. *Bir Valide Sultan Yapısı Mısır Çarşısı Restorasyonu 2013-2018* (Cilt 139). içinde İstanbul: Vakıflar Genel Müdürlüğü.
- Gürdal, E., Özgünler, S. A., & Kahraman, G. (2009). Anemas Zindanları'nın Restorasyonunda Kullanılacak Onarım Harcının Üretimi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*(3), 22-34.
- Groot, C. J., & Gunneweg, J. (2012). Two Views on Dealing with Rain Penetration Problems in Historic Fired Clay Brick Masonry. J. Válek, J. J. Hughes, & C. J. Groot içinde, *RILEM Book Series Historic Mortars Characterisation, Assessment and Repair* (Cilt 7). London: Springer.
- Hobbs, L. W., & Siddall, R. (2011). Cementitious materials of the ancient world. A. Ringbom, & R. L. Hohlfelder (Dü.), *Building Roma Aeterna : current research on Roman mortar and concrete*. içinde 128, s. 35-60. Helsinki: Societas Scientiarum Fennica.
- Hughes, J. J., & Callebaut, K. (2002). In-situ visual analysis and practical sampling of historic mortars. *Materials and Structures*, 35(2), 70-75.
- İBB KUDEB. (2016). Geleneksel Harçlar ve Koruma Harçları. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*(16), 36-50.
- Jedrzejewska, H. (1960). Old Mortars in Poland: A New Method of Investigation. *Studies in Conservation*, 5(4), 132-138.
- Jokilehto, J. (1999). *A History of Architectural Conservation*. Butterworth-Heinemann, ICCROM.
- Kahraman, G. (2008). *Erken Bizans Dönemi Horasan Harçlarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kurugöl, S. (2017). *Puzolan, Özellikler, Puzolanik Aktivite ve Deney Yöntemleri*. İstanbul: Birsan Yayın.
- Lanas, J., & Alvarez, J. I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*(33), 1867-1876.

- Lechtman, H., & Hobbs, L. (1986). Roman Concrete and the Roman Architectural Revolution. W. D. Kingery içinde, *Ceramics and Civilization. Vol. 3: High Technology Ceramics: Past, Present, Future*. American Ceramics Society.
- Loke, M. E., Pallav, K., & Cultrone, G. (2023). Challenges in Characterization and Development of Suitable Historic Repair Mortars. *International Journal of Conservation Science*, 14(3), 783-802.
- Maravelaki, P.-N., Kapetanaki, K., Papayianni, I., Ioannou, I., Faria, P., Alvarez, J., . . . Toniolo, L. (2023). RILEM TC 277-LHS report: additives and admixtures for modern lime-based mortars. *Materials and Structures*, 56(106).
- Middendorf, B., Hughes, J., Callebaut, K., Baronia, G., & Papayanni, I. (2007). Chemical Characterization of Historic Mortars. *Report 28: Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair-State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 167-COM*, 28, 37.
- Pachta, V., Stefanidou, M., Konopisi, S., & Papayianni, I. (2014). Technological Evolution of Historic Structural Mortars. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8(7), 846-854.
- Polat Pekmezci, I. (2012). *Çukurova bölgesindeki (Kilikya) bazı tarihi yapılarda kullanılan harçların karakterizasyonu ve onarım harçları için öneriler*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Polat Pekmezci, I. (2023). Science and Technology in Architectural Conservation: The role of scientific research on traditional building materials and an evaluation of conservation laboratories. *Journal of Technology in Architecture Design and Planning*, 1(2), 106-113.
- Rappoport, P. A. (2016). *Building the Churches of Kievan Russia*. Leningrad: Routledge Taylor and Francis.
- Sala, E., Giustina, I., & Plizzari, G. A. (2008). Lime mortar with natural pozzolana: Historical issues and mechanical behavior. D. D'Ayala, & E. Fodde içinde, *STRUCTURAL ANALYSIS OF HISTORIC CONSTRUCTION*. London: Taylor & Francis Group.
- Sağın, E. U., Duran, H. E., & Böke, H. (2021). Lime Mortar Technology in Ancient Eastern Roman Provinces. *Journal of Archaeological Science: Reports*(39).
- Stefanidou, M., & Papayianni, I. (2005). The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 27(9-10), 914-919.
- Tekin, Ç., & Kurugöl, S. (2012). Çeşitli organik katkıların kirecin karbonizasyonu üzerinde etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(4), 717-728.
- Teutonico, J. M. (1988). *A Laboratory Manual for Architectural Conservators*. Roma: ICCROM.
- Thomson, M. (2004). Porosity of mortars. C. Groot, G. Ashall, & J. Hughes içinde, *Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair - Final Report of RILEM TC 167-COM* (s. 77-106). RILEM Publications SARL.
- Thomson, M. L., Lindqvist, J., Elsen, J., & Groot, C. (2004). Porosity of historic mortars. *13th International Brick and Block Masonry Conference*. Amsterdam.
- Torraca, G. (2009). *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- Trout, E. A. (2019). The History of Calcareous Cements. P. C. Hewlett, & M. Liska içinde, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete Fifth Edition*. Butterworth-Heinemann.

- Uğur, T., & Güleç, A. (2016). Harç, Sıva ve Diğer Kompozit Malzemelerde Kullanılan Bağlayıcılar ve Özellikleri. *Restorasyon Ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*(17), 77-91.
- Uğurlu, E., & Böke, H. (2009). Tarihi Yapıların Özgün Değerleri ile Korunması. *Restorasyon Ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, 1(2), 17-19.
- Zhao, C., Zhang, Y., Wang, C.-C., Hou, M., & Li, A. (2019). Recent progress in instrumental techniques for architectural heritage materials. *Heritage Science*, 7(36).