9th INTERNATIONAL HALICH CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC RESEARCH

Hidrolik Kireç ve Kiremit Tozu Esaslı Horasan Harcında Keten Lifi, Keçi Kılı ve Cam Elyaf Katkılarının Deneysel Araştırılması

Experimental Investigation of Flax Fiber, Goat Hair, and Glass Fiber Additions in Hydraulic Lime and Brick Dust-Based Khorasan Mortar

Ali İhsan ÇELİK [1],
Doç. Dr. [2]Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Kayseri, 38940, Türkiye, https://orcid.org/0000-0001-7233-7647

Leyla KADERLİ[2],
Dr. Öğr. Üyesi 1Erciyes Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Anabilim Dalı, Kayseri, 38039, Türkiye, https://orcid.org/0000-0002-3497-6664

Abdullah YILDIZ[3]
Lisans Öğrencisi [6]Erciyes Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Anabilim Dalı, Kayseri, 38039, Türkiye, https://orcid.org/0009-0000-7765-5513

Hanife BÜYÜKÇEKİÇ[4]
Lisans Öğrencisi [3]Erciyes Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Anabilim Dalı, Kayseri, 38039, Türkiye, https://orcid.org/0009-0001-8142-0351

Sena KIRMIZITAŞ[5],
Lisans Öğrencisi [4]Erciyes Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Anabilim Dalı, Kayseri, 38039, Türkiye, https://orcid.org/0009-0003-8807-1988

Reyhan Meltem DEMİRTAŞ[6,]
Lisans Öğrencisi [5]Erciyes Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Anabilim Dalı, Kayseri, 38039, Türkiye, https://orcid.org/0009-0004-8669-1144

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, esas bağlayıcısı kireç ($Ca(OH)_2$) olan geleneksel Horasan harçlarının mekanik ve fiziksel performansını artırmayı amaçlanmıştır. Araştırma, hidrolik kireç, kiremit tozu, mermer tozu ve kumdan oluşan referans karışıma keten lifi, keçi kılı ve cam elyafı olmak üzere farklı lif katkılarının entegre edilmesiyle yürütülmüştür. Bu amaçla, 40×40×160 mm boyutlarında prizma kalıplar kullanılarak dört ayrı numune seti hazırlanmıştır. Referans numune, 300 gr hidrolik kireç, 400 gr kiremit tozu, 300 gr mermer tozu, 600 gr dere kumu ve 400 gr su kullanılarak hazırlanmıştır. Lifler, 12 mm uzunluğunda ve toplam bağlayıcı miktarının %1'i (hacimsel) oranında 2,5 gr karışıma eklenmiştir. Taze harç özelliklerini ölçmek için yayılma testi yapılmıştır; %1 oranında keçi kılı ve cam elyafı katkılı harç için 27 cm, keten lifi katkılı harç için ise 25 cm yayılma değerlerine ulaşılmıştır. Deneysel sonuçlar, cam elyafı

katkısının hem basınç dayanımında 2,86 MPa hem de eğilme dayanımında 2,45 MPa ile en yüksek artışı sağlayarak üstün mekanik performans sunduğunu göstermiştir. Bu sentetik lif, etkin çatlak köprüleme mekanizması sayesinde dayanımı iyileştirmiştir. Keçi kılı katkısı ise, su emme yüzdesini %11,80'e düşürerek referans harca göre en etkili hidrofobik etkiyi sağlamıştır. Buna karşın, keten lifi katkısı, basınç dayanımını hafifçe düşürmüş ve higroskopik yapısı nedeniyle su emilimini referans harca göre artırarak (%15,55) diğer liflere kıyasla daha sınırlı mekanik ve fiziksel iyileşme sağlamıştır. Geliştirilen lif katkılı Horasan harcı karışımlarının hem yapısal hem de estetik açıdan özgün dokuyla bütünlük arz etmesi beklenmekte olup, bu çalışma tarihi yapıların korunmasına katkı sağlayacak yenilikçi ve sürdürülebilir bir çözüm önerisi sunmaktadır.

Anahtar Kelimler: Restorasyon harçları, Horasan harcı, Hidrolik kireç, Keçi Kılı, Mermer Tozu, Keten Lifi, Cam Elyaf

ABSTRACT

This experimental study aims to enhance the mechanical and physical performance of traditional Horasan mortars based on the primary binder, lime ($Ca(OH)_2$) . The research was conducted by integrating different fiber additions—flax fiber, goat hair, and glass fiber—into a reference mixture consisting of hydraulic lime, tile powder, marble powder, and sand. For this purpose, four separate sets of samples were prepared using 40×40×160 mm prism molds. The reference sample was prepared using 300 gr hydraulic lime, 400 gr tile powder, 300 gr marble powder, 600 gr river sand, and 400 gr water.The fibers were added to the three different fiber-reinforced mixtures at an amount of 2.5 gr, corresponding to 1% (by volume) of the total binder quantity, with a length of 12 mm. A spread test was applied to measure the fresh mortar properties, yielding spread values of 27 cm for the 1% goat hair and glass fiber mortars, and 25 cm for the flax fiber mortar.Experimental results indicate that the glass fiber addition provided the highest increase in both compressive strength 2,86 MPa and flexural strength 2.45 MPa, presenting superior mechanical performance. This synthetic fiber improved the strength through an effective crack-bridging mechanism, delaying the brittle failure of the mortar. The goat hair addition, while showing a mechanical improvement close to that of glass fiber, provided the most effective hydrophobic effect, reducing the water absorption percentage to 11.80% compared to the reference mortar. In contrast, the flax fiber addition slightly decreased the compressive strength and, due to its hygroscopic nature, increased the water absorption to 15.55% compared to the reference mortar, thus showing more limited mechanical and physical improvement compared to the other fibers.The developed fiber-reinforced Horasan mortar mixtures are expected to integrate with the original texture both structurally and aesthetically. In this respect, the study offers an innovative and sustainable solution contributing to the preservation of historical structures.

Keywords:Restoration mortars, Horasan mortar, Hydraulic lime, Goat Hair, Marble Powder, Flax Fiber, Glass Fiber

GİRİŞ

Tarihsel süreç incelendiğinde hidrolik sertleşme teknolojisinin, volkanik hammadde kaynaklarının zengin olduğu Roma ve Roma mimarisinin etkisi altındaki Akdeniz havzasında

gelişim gösterdiği görülmektedir. M.Ö. 1. yüzyılda yaşayan Romalı mimar Vitruvius, kaleme aldığı eserinde Napoli ve Pompei civarındaki (Puzzuoli) toprağın hidrolik niteliğini vurgulamış; kireç ve kum karışımına 1/3 oranında öğütülmüş pişmiş toprak veya tuğla ilave edildiğinde harcın performansının artacağını belirtmiştir. Romalı mimar Vitruvius bu karışımın daha nitelikli bir harç sağladığını ifade etmekle birlikte, tuğla tozunun hidrolik mekanizmasına detaylıca değinmemiştir (Vitrivius 2021). İlerleyen dönemlerde Belidor ise, özellikle temellerde ve su yapılarında kullanılacak harçların tasarımında, kirece tuğla unu veya puzolan toprağı gibi katkı maddelerinin eklenmesinin önemine dikkat çekmiştir (Akman S., 1986).Bu tarihsel veriler, harç teknolojisindeki hidrolik özellik arayışının ve doğal/yapay puzolan kullanımının köklü bir geçmişe dayandığını ortaya koymaktadır.

Bizans, Selçuklu ve Osmanlı eserlerinde horasan harç ve betonu kullanımının oldukça yaygın olduğu bilinmektedir. Önceleri harç yapımında kullanılacak olan tuğla cinsi, harç malzemelerin karışım oranları, sertleşmenin tamamlanma süresine ilişkin babadan oğula geçen bilgiler, daha sonra şartnamelerle yasal hale getirilmiştir (Satongar, Ş. L. 1994).

Tarihi yapıların restorasyonunda, müdahalenin yapının özgün malzemesi ile fiziksel, kimyasal ve mekanik açıdan uyum sağlaması temel ilkedir. İncelemeler, tarihi yapılarda çoğunlukla kireç esaslı harçların kullanıldığını göstermektedir; dolayısıyla özgün dokuyla uyumsuz çimento esaslı malzemelerin kullanımı, yapıda geri dönüşü olmayan hasarlara yol açabilmektedir. Bu bağlamda, tarihi yapıların malzeme karakteristiğinin analizi ve bu yapılarla uyumlu, geliştirilmiş onarım harçlarının üretilmesi büyük önem arz etmektedir. Özellikle kireç ve ince öğütülmüş tuğla/kiremit tozunun karıştırılmasıyla elde edilen "Horasan harcı", hidrolik özelliği, dayanıklılığı ve su direnci sayesinde antik çağlardan beri Anadolu, Yunanistan ve İran coğrafyasında yaygın olarak kullanılmıştır (Altun ve diğ., 2018).

Saf kireç harçlarının suya karşı düşük direnci ve karbonatlaşma için havaya ihtiyaç duyması gibi olumsuz yönleri, puzolanik özellik taşıyan tuğla tozlarının ilavesiyle giderilerek harca hidrolik nitelik kazandırılmıştır (Mavi, 2000; Böke ve diğ., 2004). Horasan harcı, zamanla sertleşerek duvarla bütünleşen homojen bir yapı oluşturmakta; kemer ve tonoz gibi elemanlarda yük dağılımını iyileştirerek basınç dayanımını artırmaktadır (Kahraman, 2008). Ayrıca harcın yapısındaki makro boyutlu gözenekler ve gözenekli agregalar içinde çökelen kalsit kristalleri (Uğurlu ve Böke, 2009), malzeme içerisinde oluşan tuz kristallenmesi ve donma-çözülme döngülerine karşı iç gerilmeleri sönümleyerek dayanıklılığı artırmaktadır. Düşük yoğunluklu tuğla agregaları sayesinde hafifleyen bu harçlar, aynı zamanda yüksek çekme dayanımı da sergilemektedir (Böke ve diğ., 2004; Kahraman, 2008).

Günümüzde restorasyon uygulamalarının başarısını artırmak adına, bu geleneksel harçların mineral, kimyasal ve lif katkılarıyla güçlendirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Harçlarda doğru bir bilimsel çalışma için farklı analizlerin yapılması, sonuçların belirlenmesi ve tam bir analitik rapor hazırlanması gerekmektedir (Gürdal, E., Altaş, G. K., & Özgünler, S. A. 2012). Literatürde, mermer tozu katkısının kireç ve çimento esaslı malzemelerin dayanıklılığını artırdığı bilinmektedir (Ali ve diğ., 1999). Bu bağlamda harçların mekanik performansını artırmada "mikro donatı" olarak işlev gören lif kullanımı tarihsel bir kökene sahiptir. Truva kazılarından (M.Ö. 2500) (Gürdal ve Acun, 2004) 19. yüzyıl İngiltere'sine (Pekmezci, 2012) kadar saman, bitkisel lif ve keçi kılı gibi malzemelerin harçlarda çatlak kontrolü ve dayanım artışı için kullanıldığı bilinmektedir (Böke ve diğ., 2004; Ekşi Akbulut, 2006). Bu çalışma, hidrolik kireç ve kiremit tozu esaslı geleneksel horasan harcında keten lifi,

keçi kılı ve cam elyafı aynı deneysel düzende karşılaştırmalı olarak inceleyen ilk kapsamlı çalışma olma özelliğini taşımaktadır. Literatürde genellikle tek tip lif katkıları ya da farklı bağlayıcılarla yapılan çalışmalar bulunmakla birlikte, çalışmanın özgünlüğü bilime, mimari restorasyon çalışmalarına ve tarihsel mirasa önemli katkılar yapacaktır. Bu özgün yaklaşım, geleneksel harçların mekanik ve dayanıklılık özelliklerini lif tipine göre detaylı olarak ortaya koyarak bilime, mimari restorasyon çalışmalarına ve tarihsel mirasın korunmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Horasan Harcı Kiremit Tozu harcın dayanıklılığını artırarak antik yapılarda mukavemeti sağladığı bilinmektedir. Kum, yapıya hacim kazandıran ve dayanıklılığı sağlayan temel agregadır. Su ise harç malzemelerinin karıştırılmasında gereken akışkanlığı sağlar. Mermer tozu, basınç ve eğilme mukavemetlerini arttırmasını sağlar.

Deneysel çalışmada kullanılan öğütülmüş hidrolik kirecin ana bileşeni, Kalsiyum oksit (CaO)'tur. Ancak hidrolik özelliklerini kazanabilmesi için yapısında diğer bazı elementler ve oksitler de bulunur. Bunlar Kalsiyum oksit (CaO), Kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$), Silis (SiO_2), Alümina (Al_2O_3), Demir oksit (Fe_2O_3) ve Magnezyum oksit (MgO) formunda bulunur (Özer, N., Acun Özgünler, S., & Özdamar, 2023). Bu elementler, hidrolik kirece su altında da sertleşme ve dayanıklılık kazandıran bileşiklerin oluşmasını sağlar.

Kiremit tozu, pişmiş kiremitlerin mekanik öğütülmesiyle elde edilen ince ve granüle formda bir malzemedir. Genellikle muskovitik ve lateritli killer kullanılarak üretilen kiremitler; mukavemet, termal özellikler ve tane boyut dağılımının düzenlenmesinin sonucu olarak sızdırmazlık dayanımları gibi fiziksel özelliklerinin de geliştirilmesi ile teknik detayların da göz önünde bulundurularak üretilen bir malzeme haline gelmiştir. Kiremitler, doğal killerden oluşturulduğundan insan sağlığını etkileyecek herhangi bir yabancı madde içermediği gibi dış etkenlerin etkisi altında kalmalarına rağmen (hava şartlarındaki değişiklikler gibi) uzun yıllar dayanıklı tüketim malzemesi haline gelmişlerdir. Kiremit üretiminde kullanılan killerin diğer seramik malzemelerin üretimlerinde kullanılan killerden farkı yüksek demir, silis ve karbonat içeriğine sahip olmalarıdır. Bu tip killer montmorillonit, kaolinit, kuvars, klorit ve illit gibi mineralleri içerir (Daday. M. & Kara. A. 2017, Demirbilek F. 2007). Kiremit tozu, doğal bir malzeme olarak, çevre dostu özellikleri ve çeşitli uygulama alanlarıyla dikkat çekmektedir. Yenilikçi ve sürdürülebilir inşaat ve mimari uygulamalarında kiremit tozunun kullanımı, ekonomik ve ekolojik açıdan fayda sağlamaktadır. Bu nedenle, kiremit tozunun araştırılması ve kullanımı, çevre dostu inşaat malzemesi olarak uygulamalar açısından önemlidir.

Mermer tozu, mermerin kesimi ve işlenmesi aşamalarında ortaya çıkan, ana bileşeni kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) olan ince, beyaz renkli bir yan üründür (atık malzemedir) ve aynı zamanda Kalsit (kireç taşı) olarak da adlandırılır. Bu malzeme, yüksek beyazlığı, doğal bir ($CaCO_3$) kaynağı olması ve farklı boyutlara öğütülebilmesi gibi temel özelliklere sahiptir. (R. T. Erdem ve A. U. Öztürk, 2012). Mermer tozu, sıvıları geçirmeyen yapısı sayesinde seramik imalatında, ayrıca boya, plastik ve kauçuk gibi sanayilerde yoğun bir dolgu katkı maddesi olarak değerlendirilir. İnşaat alanında ise çimento, harç ve sıva karışımlarına eklenerek malzemenin dayanımına katkı sağlar ve yüzeylerin daha düzgün (pürüzsüz) bir görünüme kavuşmasına olanak tanır.

Tablo 1'de özellikleri görülen keten lifleri güçlü ve esnek yapılarıyla dikkat çeker. Uzama oranı düşüktür ve özellikleri, büyüme koşulları, moleküler yapı ve uygulanan çürütme işlemleri gibi faktörlere bağlıdır (Pickering 2008). Dayanıklılığı ve çevresel sürdürülebilirliği (düşük su tüketimi ve biyolojik olarak çözünürlüğü sayesinde) onu tekstil ve ileri kompozitler gibi diğer sanayi alanlarında vazgeçilmez bir malzeme haline getirmiştir (Bhattacharyya 2015).

Tablo 1 Keten Lifi Özellikleri (Rohit K, Dixit S ,2016)

Kimyasal Bileşim, %	**Kimyasal Özellikler**	**Fiziksel Özellikler**
Selüloz-%65-70	Selüloz- %85	Yoğunluk- 1,4 gm/cc
Pektin Maddesi-%20-25	Hemi Selüloz- %9	Standart Nem Geri Kazanımı - %10 ila %12
Odunsu ve Kütiküler dokular- %4,5	Lignen-%4	Sap çapı – 2 ila 3 mm
Kül-1%	Kül-%1	Dayanıklılık - 6 ila 8,5 gr/den
-	-	Uzama Islak-1,8% Kuru-2.2%

Tablo 2'de özellikleri gösterilen cam elyaf yüksek sıcaklık dayanımı: Doğal olarak ateşe dayanıklıdır ve yanıcı değildir bununla birlikte sıcağa veya soğuğa karşı etkilenmez ve yüksek sıcaklıklara dayanabilme yeteneğine sahiptir (Bal, B., & Özyurt, H. 2015). Ayrıca, elastikiyet ve şok direnci gösterir (Yılmaz, M. G. 2006). Bu özelliklerin birleşimi, cam elyafını yalnızca bir izolasyon malzemesi değil, aynı zamanda yüksek mekanik zorlanmalara ve termal şoklara dayanması gereken kompozit yapılar için ideal bir takviye bileşeni haline getirir.

Tablo 2 Cam elyaf özellikleri (M.M. Harussani ve diğ. 2022)

Bileşen (Kimyasal Formül)	**Kimyasal Adı**	**Ağırlıkça Oranı (%)**
SiO2	Silisyum Dioksit (Silika)	52−56
Al2O3	Alüminyum Oksit	12−16
CaO	Kalsiyum Oksit (Kireç)	16−25
B2O3	Bor Oksit	5−10
MgO	Magnezyum Oksit	0−5
Na2O + K2O	Alkali Oksitler (Sodyum+Potasyum)	0−2 (Çok Düşük)
Fe2O3	Demir Oksit	0−0.4
ZrO2	Zirkonyum Dioksit	-
TiO2	Titanyum Dioksit	0−0.8

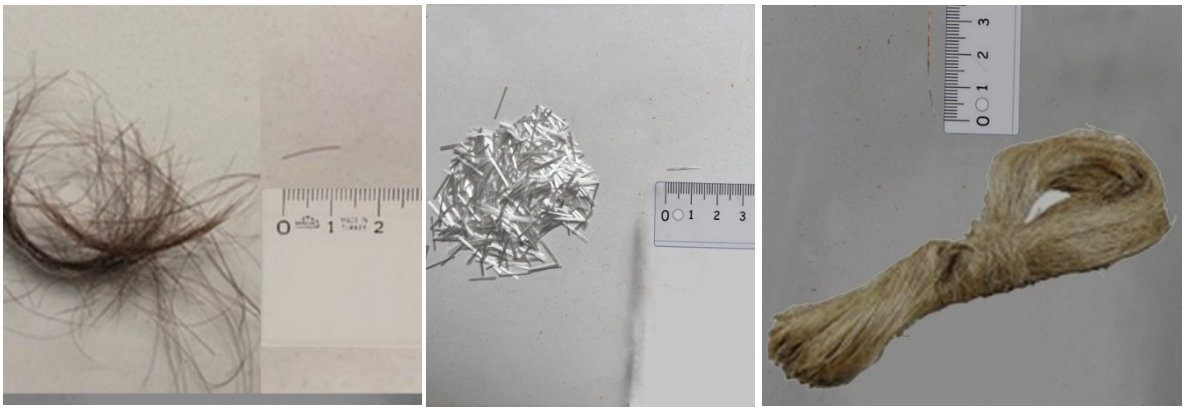
Tablo 3'de teknik özellikleri gösterilen keçi kılı, sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde Horasan harcının dayanımını ve sürekliliğini artıran etkili bir doğal takviye

malzemesidir. Deneyde kullanılan 12 mm uzunluğundaki ince lif yapısı, harç içinde homojen bir şekilde dağılarak mikro çatlakların ilerlemesini önler. Fiziksel açıdan, düşük yoğunluğu harca ek yük getirmezken, yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülü malzemenin sünekliğini ve çatlak direncini önemli ölçüde artırır. Kimyasal özelliklerine bakıldığında, lifin yüksek selüloz oranı (%80–94) kireç ve kiremit tozu ile güçlü bir bağ oluşturur. Ayrıca, nem emme özelliği ise hidratasyon sürecini dengeleyerek harcın dayanıklılığını destekler. Bu özelliklerin tümü birleştiğinde, keçi kılı katkısı Horasan harcına esneklik, çatlak kontrolü ve uzun ömür kazandırarak hem mekanik hem de fiziksel performansını belirgin biçimde iyileştirir (Jayaseelan ve diğ., 2017).

Tablo 3 Keçi kılı teknik özellikleri (Şimşek, N., & Kılıç, İ. 2021)

Özellik	**Birim**	**Değer**
Uzunluk	(mm)	19
Çap	(mm)	0.003
İncelik	(-)	6333
Lif sayısı	(per 1 kg) (x 10^3)	7,445,845
Toplam uzunluk	(m/kg) (x103)	141,471
Toplan lenf nodu (40 x 40 x 160 mm)	(m)	65,076.7
Yoğunluk	(g/cm^3)	1,5-1,6
Elastikiyet katsayısı	(GPa)	5,5-12,6
Çekme direnci	(MPa)	287-800
Uzama	(%)	3-10
Selülöz	(%)	80-94
Hemiselülöz	(%)	-
Lignin	(%)	-
Doğal nem	(%)	0
24 saat sonra nem soğurumu	(%)	25-50

Horasan harcında kullanılan keçi kılı, cam elyaf, keten lifinin teknik özellikleri şekil 1' de gösterilmiştir. Keçi kılı, geleneksel uygulamalarda kullanılan doğal bir lif örneğini temsil ederken; keten lifi, bitkisel bir doğal lif alternatifi sunmaktadır. Cam elyafı ise, yüksek mukavemeti ve harca sağladığı yapısal takviye potansiyeli nedeniyle, sentetik liflerin performansını incelemek üzere çalışmaya dahil edilmiştir.



a) b) c)

Şekil 1. a) Keçi kılı b) Cam elyaf c) Keten lifi

DENEYSEL METOD

Geleneksel Horasan harçlarının bileşenleri olan hidrolik kireç, kiremit tozu ve mermer tozu gibi puzolanik katkı maddeleri, mimari restorasyon projeleri için vazgeçilmez malzemelerdir. Bu harçların olumlu yönleri arasında yüksek dayanıklılık ve gelişmiş bağlayıcılık kapasitesi öne çıkmaktadır. Puzolanik katkılar, hidrolik kireç ile reaksiyona girerek harcın mekanik direncini artırırken, yapışma performansını maksimize eder; bu da tarihi dokuyla uzun ömürlü ve uyumlu bir entegrasyon sağlar.

Bu teknik üstünlüklerin yanı sıra, Horasan harcına çevre dostu bir alternatif sunar. Çimento bazlı harçlara kıyasla genellikle daha düşük karbon ayak izine sahip olmaları, sürdürülebilir koruma yaklaşımları için kritik bir özelliğe sahiptir. Ayrıca, ekonomiklik açısından bakıldığında, kiremit, kum veya mermer gibi yerel ve doğal malzemelerle hazırlanabilmesi, proje maliyetlerini düşürme potansiyeli taşır. En önemlisi, bu malzemelerin kullanılması harcı özgün kılmakta, tarihi yapıların aslına uygun malzeme seçimi ilkesine hizmet ederek kültürel mirasın bütünlüğünün korunmasında hayati bir rol oynamaktadır. Literatürdeki genel verilere uygun olarak düzenlenen malzeme oranlarına sahip bu karışımların tüm özellikleri hem pratik dayanıklılık testleri hem de yapısal analizleri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir (Maria A. Stefanidou. 2018, Jan Elsen ve diğ. 2018, Martínez Jiménez J. Ve diğ., 2024).

Tablo 4'deki Farklı katkı maddeleri ile hazırlanmış 4 farklı Horasan harç karışımları yer almaktadır. Horasan harcında her numunede keçi kılı, keten lifi ve cam elyaf ayrı ayrı, aynı oranlarda kullanılmış ve farklı numuneler elde edilmiştir.

Tablo 4. Horasan harcı deney tasarım tablosu

Numune No	**Hidrolik Kireç gr.**	**Kum gr.**	**Kiremit tozu gr.**	**Mermer tozu gr**	**Su gr.**	**Keçi Kılı oranı (12mm)**	**Keten Lifi oranı (12mm)**	**Cam Elyaf oranı (12mm)**
1	300	300	400	300	400	-	-	-
2	300	300	400	300	400	%1	-	-
3	300	300	400	300	400	-	%1	-
4	300	300	400	300	400	-	-	%1

Üretilen horasan harcı numuneleri kullanılan malzemeler horasan harcı, keten lifi , keçi kılı , cam elyaf şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2. Lif katkılı horasan harcı üretiminden görsel

Harç üretimi, tüm kuru bileşenlerin homojen bir şekilde şekil 3 de gösterildiği gibi harmanlanmasıyla başlamış ve karışıma kademeli olarak su ilave edilerek harç oluşturulmuştur. Su oranı, hedeflenen işlenebilirlik kıvamına göre optimize edilerek homojen bir harç yapısı elde edilene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir.



Şekil 3. Numunelerin karıştırılma aşaması

Üretim sırasına taze Horasan harcının yayılma testi Şekil 4 de gösterilmektedir. Harç yayılma test sonuçları kabul edilebilir seviyededir ve işlenebilirlik uygun görülmüştür.



Şekil 4. Horasan harcının yayılma testi

Hazırlanan karışımın kalıplara boşluksuz yerleşmesini sağlamak amacıyla, numuneler sarsma tablasında üç kademeli titretme işlemine tabi tutulmuştur. Kalıplama sonrasında numuneler, nihai dayanımlarını kazanmaları ve prizlerini tamamlamaları için 28 günlük kür sürecine

alınmıştır. Bu süreçte, hızlı su kaybına bağlı rötre çatlaklarının oluşumunu engellemek adına kür koşulları kontrollü bir ortamda sağlanmıştır.

Hazırlanan Horasan harcı karışımları ve kalıplanan numunelerin görselleri Şekil 5'te sunulmuştur. Üretilen harcın yaklaşık 45 dakika içerisinde ilk prizini aldığı gözlemlenmiştir. Bir haftalık ortam kürü uygulamasının ardından kalıptan alınan numuneler, gerekli sertleşmeyi tamamlayarak test edilebilir duruma gelmiştir.



Şekil 5. Numunelerin kalıplanma aşaması

Harcın mekanik parametresi için şekil 6b)'de gösterilen olan basınç dayanımı, standart boyutlardaki silindir veya küp numuneler üzerinde, TS EN 12390-3 standardına göre belirlenmiştir. Bu deneyde, harç numunesine, üniversal deney makinesi yardımıyla sabit bir yükleme hızında eksenel yük altında uygulanmıştır. Şekil 6a' da gösterilen Eğilme Deneyi (TS EN 12390-5) harcın eğilmede çekme dayanımı (flexural strength), özellikle eğilme gerilmelerine maruz kalan uygulamalar için hayati öneme sahiptir. TS EN 12390-5 standardına uygun olarak yapılan bu testte numuneler, iki destek üzerine yerleştirilerek orta açıklıkta tek noktadan yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin yapılması yalnızca tekil sonuçlar elde etmek için değil, hidrolik kireç ve kiremit tozu esaslı Horasan harcının keçi kılı, cam elyaf ve keten lifi katkısı ile birlikte nasıl davrandığını bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Böylelikle, tarihî yapılarda sıkça kullanılan geleneksel lif katkılı harçların modern koruma uygulamalarında güvenle kullanılabilmesi için bilimsel veriler sağlanmakta, uygun lif oranlarının belirlenmesi, malzemenin dayanıklılığının artırılması ve restorasyon malzemesi olarak performansının optimize edilmesi mümkün hale gelmektedir.



a) b)

Şekil 6. a)Eğilme deneyi b)Basınç deneyi

Cam elyafı katkılı numunelerde, kırık yüzeylerde liflerin çatlakları başarıyla köprülediği ve kırılmanın ardından dahi harca tutunarak nihai dayanımı artırdığı görülmüştür. Keçi kılı içeren numunelerde, liflerin harç ile bütünleştiği ve kırılma yüzeyinde enerji sönümleyici bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Keten lifli numunelerde ise, yüksek mekanik dirençten ziyade sadece büzülme çatlaklarını kontrol etmede rol oynadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 7 de horasan harcında yapılan numunlerin deneyler sırasında oluşan Şekil 7a) referans numune, 7b) keten lifi, 7c) keçi kılı, 7d) cam elyaf deneylerinin görselleri yer almaktadır.

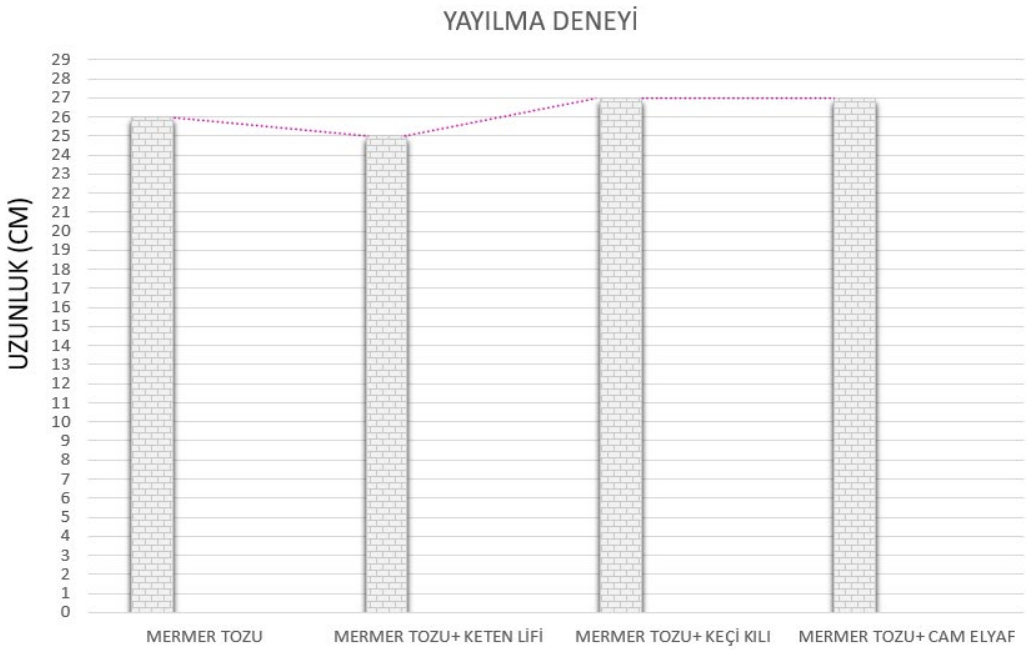


a) b) c) d)

Şekil 7. Eğilme deneyi ve basınç deneyi sonrasında numunelerin görünümü

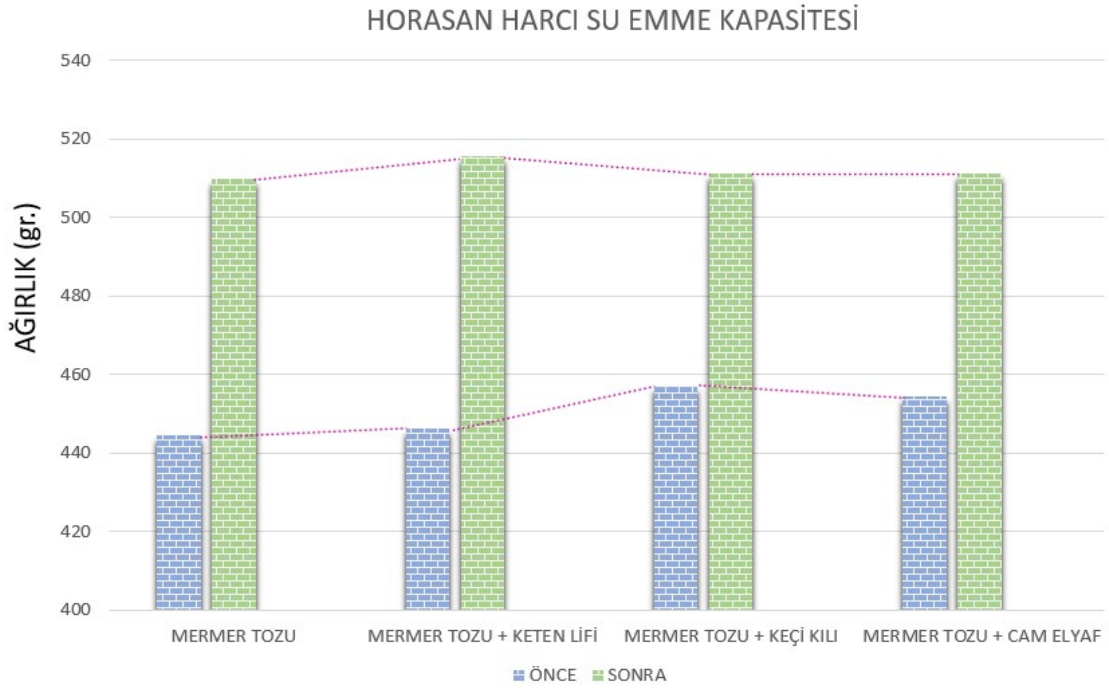
BULGULAR

Üretim sırasında taze Horasan Harcına yayılma testi uygulanmıştır. Yayılma testi, genel olarak beton ve harç gibi taze yapı malzemelerinin işlenebilirliğini ve akışkanlık düzeyini belirlemek için bir kalite kontrol yöntemidir. Modern harç karışımlarında bu test, malzemenin döküm ve yerleştirme kolaylığını güvence altına alırken, Horasan harcı gibi geleneksel bağlayıcılarda ise testin amacı harcın sadece işlenebilirliği yanı sıra restorasyon veya yapım yerindeki uygulamaya uygunluğunu, uzun süreli dayanıklılığına ve kıvamının uyumunu sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. Şekil 8'te gösterilen harç yayılma test sonuçları kabul edilebilir seviyededir ve işlenebilirlik uygun görülmüştür.



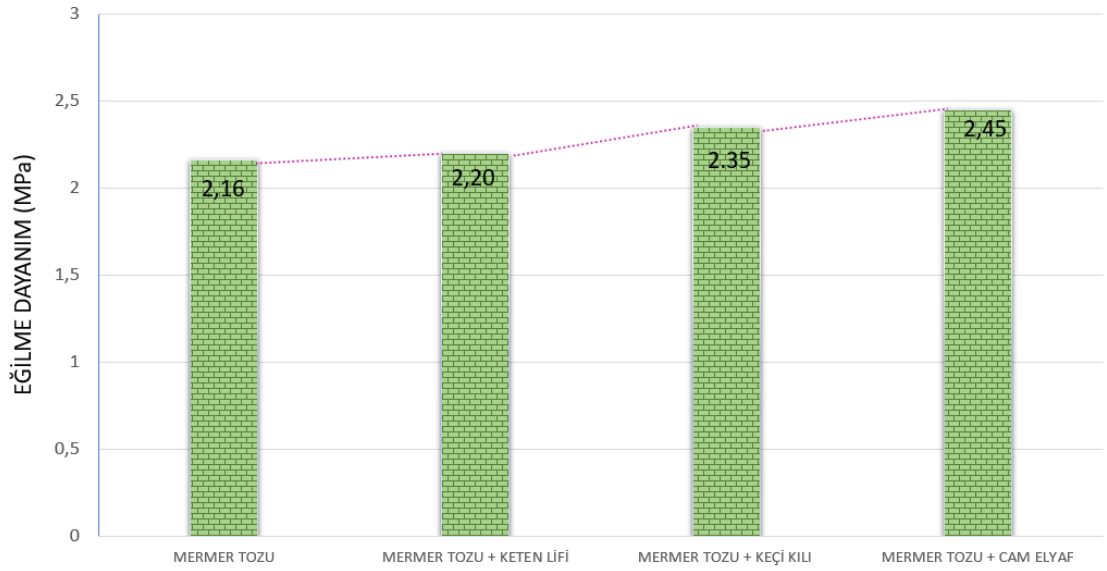
Şekil 8. Yayılma test ve sonuç grafiği

Numuneler üzerinde yapılan su emme testleri sonucunda elde edilen değerler grafik üzerinde karşılaştırmalı olarak Şekil 9'te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde referans harç (Mermer Tozu), suya doygunlukta %14,62'lik bir su emme yüzdesi sergilemiş, bu da harcın doğal yüksek gözenekliliğini teyit etmiştir. Lif katkılarının performansı referans harçtan farklılaşmıştır: Keten lifi ilavesi, su emilimini referans harca göre hafifçe artırarak %15,55 değerine yükselmiştir. Bu artış (%0,93) doğal keten liflerinin kendi bünyelerine su çekme eğilimi veya harç içinde oluşturduğu ekstra mikro boşluklarla ilişkilendirilebilir. Buna karşın, keçi kılı katkısı, harcın su emme yüzdesini referans değere göre yaklaşık %2,82 oranında azaltarak %11,80 ile incelenen en düşük su emme kapasitesine sahip numune olmuştur. Bu belirgin düşüş, keçi kılının hidrofobik (su itici) özelliklerinden ve/veya liflerin harç içindeki kılcal boşlukları doldurarak su hareketini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Cam elyafı katkısı da suya karşı inert (tepkisiz) yapısı sayesinde su emilimini referans harca göre %1,62 oranında azaltarak %13,00 değerini almıştır. Elde edilen veriler, keçi kılı ve cam elyafı takviyelerinin, Horasan harcının neme karşı direncini artırma ve gözenek yapısını optimize etme potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Bu özellikler, tarihi yapıların dış cephe restorasyonlarında harcın donma-çözünme döngülerine ve nem kaynaklı bozulmalara karşı dayanıklılığını artırması açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 9.Su emme kapasitesi grafiği

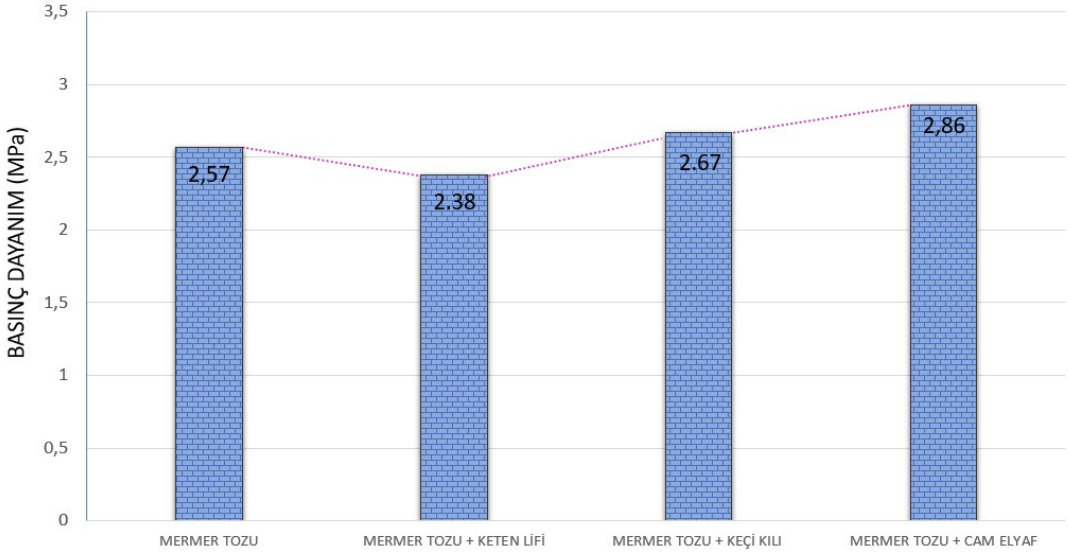
Şekil 10’da sunulan Horasan harcı numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları, mermer tozu esaslı referans Horasan harcına uygulanan farklı lif katkılarının eğilme dayanımı üzerindeki pozitif etkisini açıkça göstermektedir. Lif içermeyen referans harç, 2,16 MPa eğilme dayanımına sahipken, incelenen tüm lif türleri harcın çekme gerilmelerine karşı direncini artırmıştır. Keten lifi katkısı, dayanımı 2,20 MPa'ya çıkararak minimal bir iyileşme sağlamış, ancak keçi kılı katkısı bu performansı daha da yükselterek 2,35 MPa değerine ulaştırmıştır. En dikkate değer artış ise cam elyafı katkısıyla gözlemlenmiş olup, eğilme dayanımı 2,45 MPa'ya ulaşmıştır. Bu sonuçlar, liflerin harç matrisi içinde çatlak ilerlemesini köprüleme (crack-bridging) mekanizmasıyla geciktirdiğini, böylece malzemenin tokluğunu ve sünekliğini artırarak eğilme altındaki nihai direncini maksimize ettiğini doğrulamaktadır.



Şekil 10. Eğilme dayanım grafiği

Şekil 11'de gösterilen basınç dayanımı test sonuçları, farklı lif katkılarının Horasan harcı mermer tozu esaslı referans Horasan harcının mekanik davranışının, farklı lif katkılarıyla (keten lifi, keçi kılı ve cam elyafı) modifiye edilmesinin sonuçlarını açıkça ortaya koymaktadır. Referans harç (Mermer Tozu), 2,57 MPa basınç dayanımına sahipken, lif katkılarının etkisi değişkenlik göstermiştir. Keten lifi katkısı, harcın basınç dayanımını 2,38 MPa ile referans değere göre hafifçe düşürürken, bu durum liflerin içinde homojen olmayan dağılımı veya lif-matris arayüzeyindeki zayıf bağlanmadan kaynaklanan olası gerilim yoğunlaşmalarına bağlanabilir. Buna karşın, keçi kılı ve cam elyafı katkıları referans harca kıyasla dayanımı artırıcı bir etki göstermiştir. Keçi kılı ilavesiyle basınç dayanımı 2,67 MPa'ya yükselirken, cam elyafı katkısı ile 2,86 MPa'ya ulaşarak incelenen numuneler arasında en yüksek mekanik performansı sergilemiştir.

Bu bulgular, özellikle cam elyafının, yüksek mukavemet ve etkin çatlak köprüleme mekanizması sayesinde harcın gevrek kırılmasını geciktirerek, nihai basınç dayanımını kayda değer ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Sonuç olarak, cam elyafı ve keçi kılı katkılarının, tarihi yapı restorasyonlarında kullanılacak Horasan harçlarının mekanik stabilitesini ve dayanıklılığını artırmak için potansiyel taşıdığı göstermektedir .



Şekil 11. Basınç dayanım grafiği

SONUÇ

Bu çalışmada, tarihi yapıların restorasyonunda ve modern sürdürülebilir mimaride kullanılmak üzere; hidrolik kireç, kiremit tozu, mermer tozu ve kum esaslı, özgün dokuyla uyumlu yeni bir Horasan harcı formülasyonunun geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda Horasan harcına sırasıyla keten lifi, keçi kılı, ve cam elyaf eklenerek katkı maddelerinin harcın fizikomekanik performansı üzerindeki etkileri dört farklı deney grubu üzerinden analiz edilmiştir.

Analiz edilen bulgular şu şekildedir:

1. Yayılma testi

Taze harç özelliklerini ölçmek için yayılma testi uygulanmış; %1 oranında keçi kılı ve cam elyafı katkılı harç için 27 cm, keten lifi katkılı harç için ise 25 cm yayılma değerlerine ulaşılmıştır.

2. Basınç ve Eğilme Dayanımı Performansı

Mekanik dayanım testleri, lif katkılarının mermer tozu esaslı Horasan harcının taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin altını çizmektedir. Cam elyafı katkısı, hem basınç dayanımında (2,86 MPa) hem de eğilme dayanımında (2,45 MPa) referans harca kıyasla en üstün performansı sergilemiştir. Basınç dayanımındaki bu %11,3'lük (2,57 MPa'dan 2,86 MPa'ya) ve eğilme dayanımındaki %13,4'lük (2,16 MPa'dan 2,45 MPa'ya) iyileşme, sentetik liflerin harç içinde etkili gerilme dağılımı ve çatlak köprüleme (crack-bridging) yeteneklerini kanıtlamaktadır. Keçi kılı da her iki dayanım türünde referans harcın performansını geçerken, keten lifi basınç

dayanımını hafifçe düşürmüştür.

3. Su Emme Davranışının Değişimi

Harç numunelerinin su emme kapasitesi analizleri, lif katkılarının porozite yapısını farklı yönlerde etkilediğini ortaya koymuştur. Keçi kılı katkısı, su emme yüzdesini referans harcın %14,62 değerinden %11,80'e düşürerek en etkili hidrofobik etkiyi sağlamıştır. Bu, keçi kılının su itici özellikleri veya harç içindeki kılcal boşlukları başarıyla doldurarak suyun ilerlemesini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Cam elyafı katkısı da su emilimini %13,00'e düşürerek olumlu bir etki yaratırken, keten lifi katkısı (%15,55), doğal lifin higroskopik (nem çekme) yapısı nedeniyle su emilimini referans harca göre artırmıştır.

Sonuç olarak, optimize edilen bağlayıcı oranları ve özelleştirilmiş katkı maddeleriyle üretilen bu yeni nesil Horasan harçları; hem tarihi yapıların onarımında ihtiyaç duyulan fiziksel ve mekanik uyumu sağlamakta hem de endüstriyel ölçekte üretilebilir standart bir nitelik taşımaktadır. Yerli hammaddelere dayalı, düşük karbonlu ve çevre dostu bu formülasyonların, hazır harç sektörüne kazandırılarak restorasyon uygulamalarında güvenilir ve sürdürülebilir bir malzeme alternatifi oluşturması hedeflenmektedir.

Yazma Sürecinde Üretken Yapay Zeka ve Yapay Zeka Destekli Teknolojilerin Beyanı

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında yazarlar, okunabilirlik, dil bilgisi, yazım ve metnin üslubu gibi yazımın birçok önemli yönünü iyileştirmek için Chat GPT ve Gemini kullanmışlardır. Bu aracı kullandıktan sonra yazarlar, içeriği gerektiği gibi gözden geçirip düzenlemiş ve yayının içeriğinin tüm sorumluluğunu üstlenmişlerdir.

KAYNAKÇA

Akman, S., Güner, A., & Aksoy, İ. H. (1986). Horasan harcı ve betonunun tarihi ve teknik özellikleri. II. Uluslararası Türk-İslam Bilim ve Teknoloji Tarihi Kongresi, İstanbul,(28 Nisan-2 Mayıs 1986).

Ali, M.M., Agarwal, S.K., Solankey, A.K., Handoo, S.K. (1999), High – Performance, marble-like plaster coatings, National Council for Cement and Building Materials.

Altaş, G. K., Özgünler, S. A., & Güldal, E. (2012). İstanbul'daki Roma Dönemi Saray Yapılarındaki Horasan Harçlarının İncelenmesi.

Altun, M. G., Özen, S., & Mardani-aghabaglou, A. (2018). Polipropilen lif kullanımının doğal hidrolik kireçli harçların kuruma büzülmesine etkisi. Sakarya University Journal of Science, 22(2), 427-435.

Bal, B., & Özyurt, H. (2015). Cam elyaf dokuma ile güçlendirilmiş tabakalı kaplama kerestenin bazı teknolojik özellikleri. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(1), 9-16.

Bhattacharyya, D., Subasinghe, A. ve Kim, N. K. (2015) . “Natural Fibers: Their Composites and Flammability Characterizations”, Multifunctionality of Polymer Composites, 1 (1), 102-143.

Böke, H., Akkurt, S. ve İpekoğlu, B. (2004). Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvalarının Özellikleri. Yapı Dergisi 269 (s. 90-95), Nisan.

Daday. M. & Kara. A. (2017). Development Of Using Local Raw Materials Deposits İn Eskisehir Region. Turkey. J. Aust Ceram Soc 53, 591–597.

Demirbilek F. (2007). Kaolinitik ve illitik seramik killerinin farklı sıcaklıklarda mineralojik yapılarının. plastikliklerinin ve fiziksel özelliklerinin değişimi. Yüksek Lisans Tezi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı.

Duman, O., & Tunç, S. (2008). Electrokinetic Properties Of Vermiculite And Expanded Vermiculite: Effects Of Ph, Clay Concentration and Mono and Multivalent Electrolytes. Separation Science and Technology, 0149, 3755-3776. https://doi.org/10.1080/01496390802219109.

Ekşi Akbulut, D. (2006). Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Harçların Seçimine Yönelik Bir Öneri. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gandhi, P. R., Jayaseelan, C., Mary, R. R., Mathivanan, D., & Suseem, S. R. (2017). Acaricidal, Pediculicidal and Larvicidal Activity Of Synthesized Zno Nanoparticles Using Momordica Charantia Leaf Extract Against Blood Feeding Parasites. *Experimental Parasitology*, *181*, 47-56.

Gürdal, E., Altaş, G. K., & Özgünler, S. A. (2012). İstanbul'da Bulunan Erken Bizans Dönemi Dini Yapılarında Kullanılan Horasan Harçlarının Özelliklerinin İncelenmesi. Vakıf Restorasyon Yıllığı, 2.

Gürdal, E. ve Acun, S. (2004). Mineral Esaslı Sıvalarda Polipropilen Lif Katkısının Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. 2.Ulusal Yapı 81 malzemesi Kongre ve Sergisi, TMMOB Mimarlar Odası Büyükkent Şubesi, İstanbul.

Kahraman, G. (2008). Erken Bizans Dönemi Horasan Harçlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kayabaşi, R., Çelik, A. İ., Uzer, A. U., Tunç, U., & Şener, A. (2025). Effect Of Expanded Vermiculite And Binder Ratios On Fire Resistance And Mechanical Properties Of Sustainable Lightweight Geopolymer Concretes. Powder Technology, 121729.

Marcos, C., & Rodriguez, I. (2011). Expansibility of Vermiculites İrradiated Applied Clay Science, With Microwaves. 51(1-2), https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.019 .

Mavi, Ö. (2000). Kireç Harç ve Sıvaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Pekmezci, I. P. (2012). Çukurova Bölgesindeki (Kilikya) Bazı Tarihi Yapılarda Kullanılan Harçların Karakterizasyonu ve Onarım Harçları İçin Öneriler.

Pickering, K. L. (2008). Properties And Performance Of Natural-Fibre Composites, Sawston, Birleşik Krallık: Woodhead Publishing.

Martínez Jiménez J, Padilla Fernández JJ, Sánchez López EH (2024). An Experiment Measuring Water Consumption in Roman Hydrophobic Mortar (opus signinum). European Journal of Archaeology. 2024;27(4):488-506. doi:10.1017/eaa.2024.20.

Harussani M.M., Sapuan S.M., Nadeem G., Rafin T., Kirubaanand W. (2022). A Review Recent Applications Of Carbon-Based Composites İn Defence İndustry (Pages 1281-1300).

Özer, N., Acun Özgünler, S., & Özdamar (2023). Türkiye Biyomikritik Kireçtaşının Doğal Hidrolik Bağlayıcı Üretiminde Ham Madde Olarak Kullanım Olanaklarının Araştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 39(1), 577-592. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1179147 .

Pusat, S. E. (2002). Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Harç Üretimi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Rohit K, Dixit S. (2016). Bir İnceleme- Doğal Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Gelecekteki Yönü. Yenilenebilir Kaynaklardan Polimerler. 2016;7(2):43-59. doi: 10.1177/204124791600700202 .

R. T. Erdem and A. U. Öztürk, 2012 “Mermer Tozu Katkısının Çimento Harcı Donma-çözünme Özellikleri Üzerine Etkisi”, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 1, no. 2, pp. 85–91,.

Satongar, Ş. L. (1994). “İstanbul şehir surları horasan harçları üzerine bir araştırma”.

Strand, P.R., (1983). Vermiculite, Industrial Minerals And Rocks, AIME, 1375-81.

Şimşek, N. (2021). Kenevir lifi, keçi kılı ve polipropilen elyaf katkılı horasan harcının özelliklerinin araştırılması (Master's thesis, Kırklareli Üniversitesi).

https://www.tse.org.tr/ TS EN 12390-3

Uğurlu, E. ve Böke, H. (2009). Osmanlı Dönemi Yapılarında Kullanılan Horasan Sıvalarının Özellikleri. Kâgir Yapılarda Koruma ve Onarım Semineri, KUDEB (s. 135-142). İstanbul, Eylül.

Yılmaz, M. G. (2006). Cam Elyaf Katkılı Doymamış Polyester Malzemelerde Mineral Katkıların Mekanik ve Tribolojik Özellikleri (Master's Thesis, Sakarya Universitesi (Turkey).